

Vol. 17. No. 5. 1969

KFKI

KÖZLEMÉNYEK

ОБЩЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО ИНСТИТУТА ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

REPORTS OF THE CENTRAL RESEARCH INSTITUTE FOR PHYSICS

Szerkeszti: Ádám András
Редактор: А.Адам
Editor: A. Adám

MTA KÖZPONTI FIZIKAI KUTATÓ INTÉZET KÖNYVTÁR- ÉS KIADÓI OSZTÁLYA
БИБЛИОТЕКА И ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ОТДЕЛ
ЦЕНТРАЛЬНОГО ИНСТИТУТА ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЕНГЕРСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
HUNGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
CENTRAL RESEARCH INSTITUTE FOR PHYSICS LIBRARY AND DOCUMENTATION DEPARTMENT
BUDAPEST, 114. POB 49.

Technikai szerkesztő: Nagy Imréné
Megjelent: 1969. okt. 5.

Példányszám: 320
Rotaszám: 4740

A kiadásért felelős: Jánossy Lajos

Megjelenik: kéthavonta
Előfizethető a 173.144-52. MNB bevételi számlán
Előfizetési díj: egyes szám 5,-Ft, egy évre: 30,-Ft /6 szám/

Vol. 17. No. 5. 1969.

TARTALOM

	<u>Oldal</u>
1. Kósa Somogyi István, Tóth László, Kertész Zoltán: Polietilén kábelszigetelés termomechanikai tulajdonságainak javítása ionizáló sugárzással	237
2. Tóth László, Zádor Erika: Mikromennyiségű hidrogén és C ₁ -C ₄ szénhidrogének egymásmelletti meghatározása gázkromatográffal	249
3. Németh Géza: Megjegyzések a Bessel-függvények gyökelinek Csebisev-sorfejtéséhez	257
4. Balla János: Alacsony forráspontu folyadékoknál alkalmazott kondenzációs szintérzékelők elméleti vizsgálata	267

Р Е З Ю М Е

1. Улучшение термомеханических свойств полиэтиленовой кабельной изоляции ионизирующим излучением

И. Коша Шомоди, Л. Тот, З. Кертес

Температурный интервал размягчения облученной γ -лучами ^{60}Co полиэтиленовой изоляции при поглощении 30–40 Мрад смещается к более высоким температурам. Полиэтилен поглотивший более высокие дозы ($D > 80\text{--}100$ Мрад) не размягчается.

Полиэтилен поглотивший дозу 30–150 Мрад имеет прочность на разрыв 120–200 кг/см². С повышением температуры прочность постепенно снижается и в температурном интервале 250–300°C составляет 5–10 кг/см².

Деформация под нагрузкой полиэтиленовой изоляции после поглощения дозы 30–40 Мрад до температуры 400°C составляет максимально 20%.

При облучении в реакторе скорость сшивания в полиэтилене больше, чем при γ -облучении.

2. Совместное определение микро-количеств газов H_2 и углеводородов $\text{C}_1 - \text{C}_4$ с помощью газового хроматографа

Ласло Тот, Эрика Задор

Метод выработан для качественного и количественного определения микро-количеств газов H_2 и углеводородов $\text{C}_1 - \text{C}_4$ образовавшихся при радиолизе органических соединений. Анализы проводились на изотермическом газовом хроматографе с колонками заполненными силикагелём.

3. Замечания о вычислении корней бесселевых функций

Г. Немец

В этой работе мы определяем многочленные приближения для вычисления корней бесселевых функций. Эти приближения мы представляем как частичные суммы сходящегося ряда по полиномам Чебышева. Коэффициенты рядов мы оставляем в таблицах до точности 15 десятичных цифр для случаев индекса $\nu = 0, 1, 1/3, 2/3, 1/4, 3/4$.

4. Теоретическое исследование конденсационных чувствительных элементов указателей уровня, применяемых при криогенных жидкостях

Я. Балла

Указание и регулировка уровня сжиженных газов с низкой точкой кипения (CH_4 , O_2 , N_2 , Ne , H_2 , и He) является ежедневной задачей в области научных исследований и промышленности. Специальные воздействия (например, наличие сверхнизких температур, высоких магнитных полей и т.д.), часто возникающие при исследовании и требование надежной работы особенно обосновывает применение конденсационных регуляторов уровня простой конструкции. Описываются методы теоретического исследования чувствительных элементов для криогенных жидкостей. Полученные результаты сравниваются с данными измерений.

S u m m a r i e s

1. Improvement of the Thermomechanical Behaviour of Cable Insulator Grade Polyethylene Exposed to Ionizing Radiation

I. Kosa-Somogyi, L. Tóth, Z. Kertész

The softening temperature of cable insulator grade polyethylene irradiated with ^{60}Co gamma rays was observed to shift on the absorption of doses from 30 to 40 Mrad gradually to higher temperatures until no more softening could be established on the absorption of doses from 80 to 100 Mrad. The tensile strength of polyethylene irradiated with gamma rays was found to be 120-200 kg/cm^2 at room temperature after the absorption of 30-150 Mrad. The tensile strength gradually decreases with increasing temperatures and was measured as 5-10 kg/cm^2 in the temperature range from 250° to 300°C.

The deformation of polyethylene under pressure was found to be not more than 20% up to 400°C after the absorption of doses from 30-40 Mrad. The rate of cross-linking is higher in reactor irradiated than in gamma irradiated polyethylene.

2. Simultaneous Determination of Very Small Amounts of H₂ and Hydrocarbons C₁-C₄ by Gaschromatography

L. Tóth, Erika Zádor

A method is described which has been developed for the qualitative and quantitative determination of very small amounts of H₂ and hydrocarbons C₁-C₄ produced during the radiation chemical decomposition of organic compounds. The measurements are performed with the use of an isotherm gaschromatograph with silicagel column.

3. Note on the Computation of Roots of Bessel Functions

G. Németh

Polynomial approximations are given for the computation of roots of Bessel functions $J_\nu(x)$ with the aid of expansions in Chebyshev polynomials. The coefficients of these convergent expansions, evaluated to 15 decimal digit accuracy, are listed in tabulated form where the order $\nu = 0, 1, 1/3, 2/3, 1/4, 3/4$.

4. Investigation of Condensation Level Indicators for Low Boiler Liquids

J. Balla

The condensation gauges of simple construction used for indicating and controlling the level of low boiler liquid gases /CH₄, O₂, Ne, H₂ and He/, routinely applied in research and industry, are investigated with particular regard to the safety requirements which have to be met under some special conditions /e.g. extremely low temperatures, presence of high magnetic field, etc./ of scientific research. The methods developed for the theoretical consideration of the level sensing devices are described and the theoretical predictions are compared with measured data.

POLIETILÉN KÁBELSZIGETELÉS TERMOMECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK JAVÍTÁSA IONIZÁLÓ SUGÁRZÁSSAL

Irta: Kósa Somogyi István, Tóth László, Kertész Zoltán

Összefoglalás

^{60}Co gamma-sugárzás hatására a polietilén kábelszigetelés lágyulási hőfoktartománya mintegy 30–40 Mrad elnyeléséig fokozatosan magasabb hőmérsékletek felé tolódik el. Nagyobb $D < 80\text{--}100$ Mrad/ dózisos elnyelése után a polietilén nem lágyul.

A 30–150 Mrad gamma-dózist elnyelt polietilén szakítási szilárdsága szobahőmérsékleten $120\text{--}200$ kg/cm². A szakítási szilárdság a hőmérséklet emelésével fokozatosan csökken és a $250\text{--}300^\circ\text{C}$ hőmérséklettartományban értéke $5\text{--}10$ kg/cm².

A polietilén szigetelés nyomás alatti deformációja 30–40 Mrad elnyelt dózis után egészen 400°C -ig nem nagyobb mint 20 %.

A reaktorban végzett besugárzás gyorsabb térhálósodást idéz elő, mint a gamma-sugárzás.

Bevezetés

A polietilént kiváló dielektromos tulajdonságai miatt nagy mennyiségben használják vezetékek és kábelek szigetelésére. A polietilén jó szigetelő képessége elsősorban apoláros kémiai szerkezetének köszönhető. Széles körű elterjedését elősegítette az, hogy olcsó, az időjárás és környezeti viszonyok széles határok közötti változását is jól bírja, a legtöbb vegyszerrel szemben ellenálló, mechanikai tulajdonságai viszonylag jók és könnyen megmunkálható.

Az erősáramu technikában a polietilént főleg a közepes feszültségtartományban 15 kV-ig használják elterjedten, de készültek már 34, 69, sőt 138 kV-os polietilén szigetelésű kábelek is [1, 2, 3].

A polietilén kábelszigetelés még szélesebb körű alkalmazásra található, ha sikerülne kiküszöbölni a kábelipar szempontjából kedvezőtlen tulajdonságait, amelyek között az egyik legjelentősebb az, hogy a polietilént szigetelésként viszonylag alacsony hőmérsékletig /kb. 60°C -ig/ lehet biztonságosan felhasználni. Az e téren végzett kutatások [4] azt mutatták, hogy a polietilén ezen "üzemi" hőmérséklete térhálósítással

jelentősen emelhető. A térhálósítás kémiai úton peroxidok adagolásával, vagy nagyenergiájú sugárzások alkalmazásával hozható létre.

A nagyenergiájú sugárzással végzett térhálósítás során a polietilénbe az elektromos tulajdonságokat befolyásoló adalékanyagok nem kerülnek, így ez a módszer ebből a szempontból kedvezőbbnek látszik. A sugárzásos térhálósítás viszont az emberi szervezetre káros sugárzások elnyelésére megfelelő védelmi és biztonsági berendezéseket kíván, amelyek a folyamat ipari bevezetésekor nagyobb beruházási költséget jelentenek, mint a kémiai térhálósításhoz szükséges folyamatos vulkanizáló berendezés, amely a kábelgyárakban egyébként is megtalálható.

Jelen munkánkban azokról a kísérletekről számolunk be, amelyek során a polietilén kábelszigetelés termomechanikai tulajdonságainak megváltoztatására ionizáló sugárzást használtunk.

Kísérleti rész

Az anyagok és besugárzásuk

Vizsgálatainkhoz két különböző méretű kábel polietilén szigetelését használtuk fel.

A kábeleket A és B jelzéssel láttuk el. Szigetelőanyaguk fontosabb jellemzőit az 1. táblázatban közöljük.

1. táblázat

A kábelek polietilén szigetelésének általunk meghatározott néhány jellemzője

Jellemző	Jelzés	A	B
fajsúly g/cm ³		0,9202	0,9160
térfogati ellenállás ohm cm		1,5·10 ¹⁸	1,5·10 ¹⁸
kristályos fázis* % /20°C/		60	57
lágypont °C		115-125	110-130
tg δ x.10 ⁴		3-9	3-5
dielektromos állandó		2,3-2,8	2,3-2,4
szakitási szilárdság kg/cm ³		300-600	300-400

* A kristályos fázis százalékos arányát a mért fajsúlyok felhasználásával az [5] munka 38-1 ábrája alapján állapítottuk meg.

A kiindulási anyagok közel azonos tulajdonságai miatt az egyes paraméterek közötti összefüggések megállapítására a sorozatvizsgálatokhoz főként az A jelű kábelből készített próbatesteket használtuk.

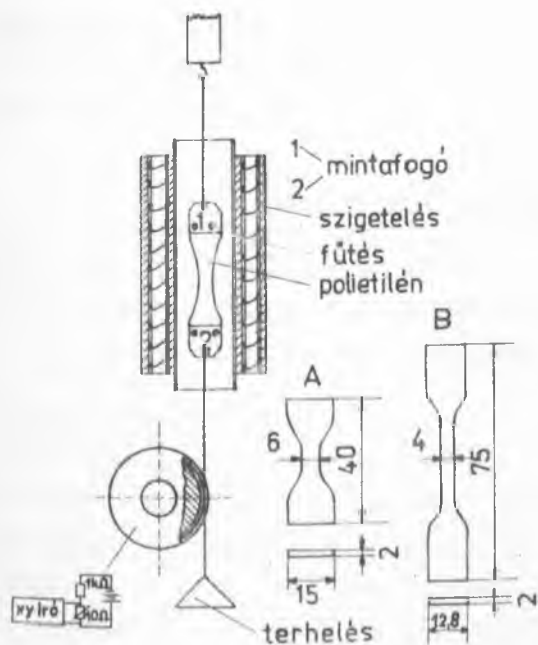
A mintákat háromféleképpen készítettük elő a besugárzásra:

- a/ a besugárzást nyitott ampullákban végeztük; a mintákat atmoszférikus nyomású levegő vette körül;
- b/ a mintákat 10^{-5} torr nyomásra levákuumoztuk, majd az üvegampullákat szurólánggal lezártuk;
- c/ a mintákat először 10^{-5} torr nyomásra levákuumoztuk, ezután az ampullákat 100 torr nyomásig argongázzal töltöttük meg, majd szurólánggal lezártuk.

A besugárzásokat 2.000 Ci aktivitású ^{60}Co izotópot tartalmazó gamma-sugárforrásban végeztük 0,5 Mrad/óra dózisteljesítmény mellett. A minták egy részét a besugárzás befejezte után azonnal vizsgáltuk, más részüket $100-120^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten az ampullák felnyitása nélkül 24 óráig hőkezeltük és csak ezután vizsgáltuk.

A szakítási szilárdság mérése

Ezekhez a vizsgálatainkhoz az A jelű kábelből készült próbatesteket használtuk, amelyek mérete az 1. ábrán látható.



1. ábra

A magas hőmérsékleten végzett szakítási szilárdság mérésekhez használt berendezés vázlatja. Jobb oldalt alul: a szakítási szilárdság méréshez használt próbatestek méretei.

A próbatestek szakítási szilárdságát kétféle módon mértük:

- a/ szobahőmérsékleten, Anyagvizsgáló Készülékek Gyára tip. Sz 10-1 szakítógéppel;
- b/ statikus terhelés alatt egyenletesen emelkedő hőmérséklet mellett.

A b/ pont alatti mérésekhez használt berendezésünk vázlatja az 1. ábrán látható. A kemence belsejében uralkodó hőmérsékletet vas-konstantán termoelemmel mértük. A minta alsó részéhez csatlakozó huzal egy potenciométer tengelyére erősített tárcsán volt átvetve, amely így a minta nyulásának megfelelően a tengelye körül elfordult. A potenciométer egyik sarka és csuszója között jelentkező feszültség arányos volt a polie-

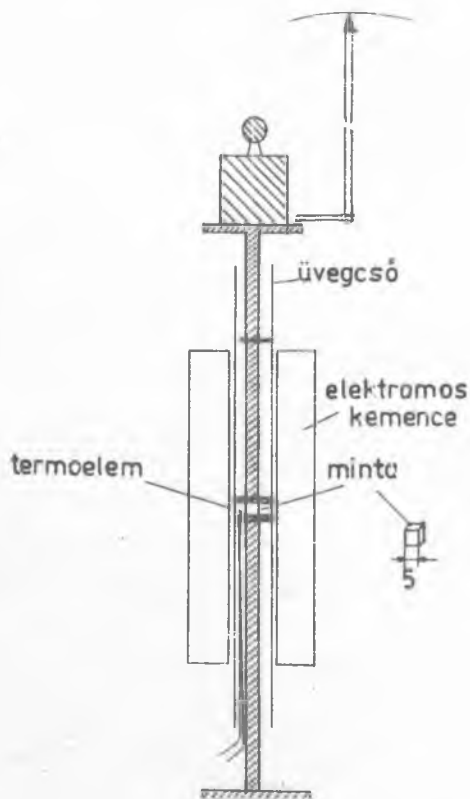
tilén megnyulásával. A polietilén konstans terhelés alatti nyulásának hőmérsékletfüggését Bryans 20180 X-Y/T íróval folyamatosan regisztráltuk. Az író X /hőmérséklet/ értékét a vas-konstantán termoelem feszültsége, az Y /nyulás/ értékét a potenciométeren fellépő feszültségesés adta. A mérések során az állandó terhelés 473 g, ill. egyes esetekben 773 g volt /ezt az ábrákon feltüntetjük/.

A szakítási szilárdság jellemzésére két értéket, a kezdeti, ill. a szakadás pillanatában észlelhető keresztmetszetekkel számolt értékeket adjuk meg.

A nyomószilárdság mérése

A nyomószilárdság változását statikus terheléssel, folyamatosan változó hőmérséklet mellett vizsgáltuk a 2. ábrán felvázolt készülék segítségével. Itt a minta méretének változását mechanikusan vezérelt és

megfelelően áttételezett mutató követte. A hőmérsékletet vas-konstantán termoelem érzékelte, amelynek elektromotoros erejét automatikus potenciométerrel regisztráltuk. A készüléket a sárgarézből készült tartórudak hőkitágulásának megállapítása és korrekcióbevétele miatt a mérések előtt kalibráltuk.



2. ábra

A nyomószilárdság vizsgálatára használt berendezés vázlata.

A térhálósítás mérése

A térhálósodás folyamatát kémiai és szélessávu magmágneses rezonancia /NMR/ módszerrel vizsgáltuk.

A kémiai módszer azon alapult [6], hogy a teljesen térhálósodott polimer a szokásos oldószerekben nem oldódik, hanem csak duzzad. A duzzadás annál nagyobb minél kevesebb C-C kötéssel kapcsolódnak egymáshoz a szomszédos molekulák. Mind a duzzadás, mind az oldódás mértékét az oldószerbe helyezett minták méretének, illetve súlyának változásából határoztuk meg.

Az NMR mérésekkel közvetlenül kimutatható a kristályos és amorf fázis aránya. A teljesen térhálósodott polietilén amorf szerkezetű, benne a molekulák a folyadékokhoz hasonlóan távoli rendezettség nélkül helyezkednek el. Az NMR vizsgálatok célja a kristályos, illetve amorf fázis mennyiségének, ill. azok változásának a meghatározása volt besugárzott és nem besugárzott mintákon.

A polietilén NMR spektrumai finomszerkezetet mutatnak, két különböző szélességű egyszerű spektrumra bonthatók. A keskeny, nagy amplitudójú ^1H rezonanciajel az amorf fázisból a széles, kis amplitudójú jel a kristályos fázisból származik. Az adott fázisban lévő anyag viszonylagos mennyisége a komponensek kétszeres integrálásával /integrális intenzitás/ meghatározható.

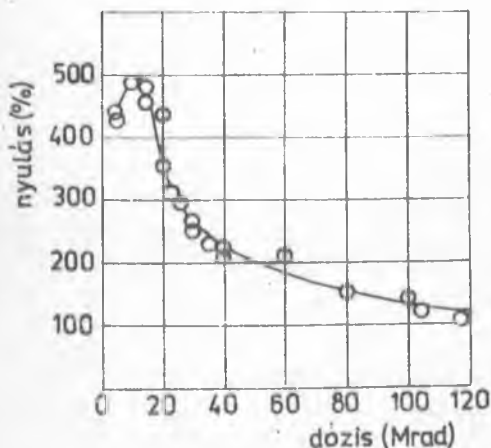
Az integrális intenzitás /tehát a fázisarányok mennyiségének/ meghatározási pontossága $\pm 5\%$, amit az ábrákon nem tüntettünk fel.

Méréseinkhez a KFKI Szilárdtestfizikai Laboratóriumának "wide-line" magmágneses rezonancia spektrométerét használtuk. Mérési frekvencia 24 MHz. Gerjesztő radiofrekvenciás tér és modulációs amplitudó az optimális feltételeknek megfelelő. A hőmérsékletet a labroatórium "gáz-áramos" hőmérsékletszabályozó rendszerével [7] szabályoztuk.

Kísérleti eredmények

Szakítási szilárdság

A szobahőmérsékleten végzett szakításoknál a besugárzás nélküli és a kisebb dózisokat elnyelt minták erősen megnyultak /3. ábra/, mintegy

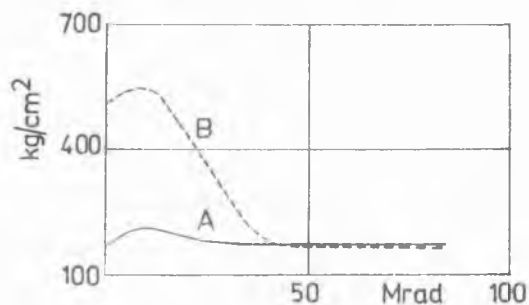


3. ábra

A szobahőmérsékleten mért nyulás változása az elnyelt dózissal.

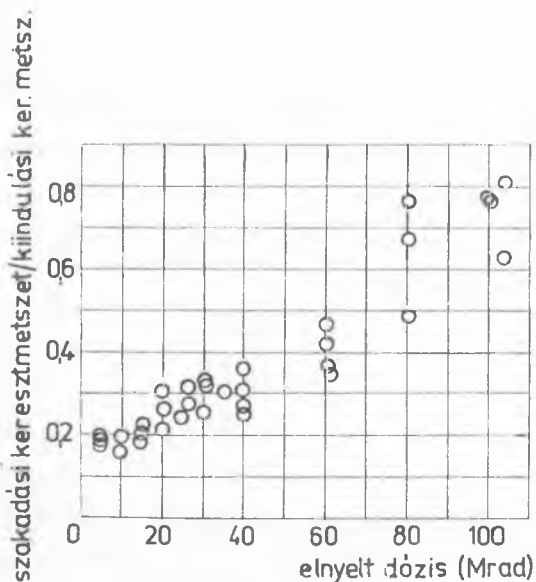
30-40 Mrad dózis után azonban a minták rideggé váltak, és különösen magasabb hőmérsékleten, jelentéktelen megnyulás után szakadtak. A besugárzatlan és kis dózist elnyelt mintákon szakítás közben kis váll képződött, amelybe lassan az egész próbatest anyaga "befolyt". A nagyobb dózist elnyelt minták szakítási mechanizmusa ettől teljesen eltért; a minta kezdetben kismértékben rugalmasan megnyult, majd a kiindulási keresztmetszet változása nélkül elszakadt. A szakítási szilárdság változását a dózis függvényében a 4. ábra mutatja.

Az 5. ábrán a szakadási és kiindulási keresztmetszetek arányának változása látható a dózis függvényében. A 6. ábra állandó terheléssel végzett tipikus szakítási görbét mutat be.



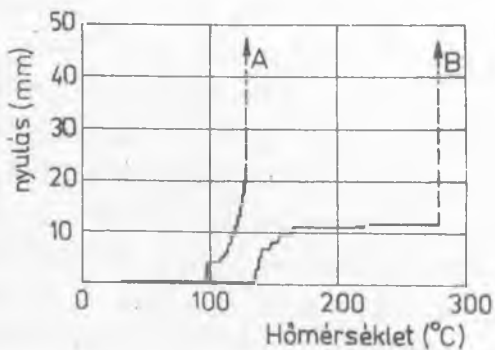
4. ábra

A szakítási szilárdság változása a dózissal szobahőmérsékleten. (A a kiindulási B a szakadási keresztmetszettel számolva.)



5. ábra

A B jelű próbatestek szakadási és kiindulási keresztmetszete arányának változása az elnyelt dózis függvényében.

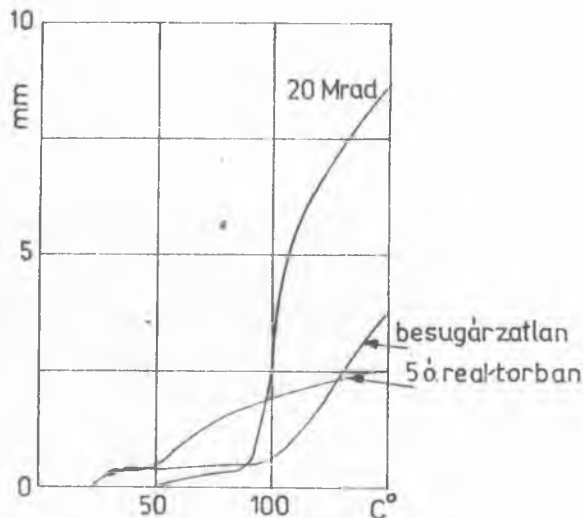


6. ábra

200 g terheléssel felvett szakítási görbe. A: besugárzás nélküli minta; B: 40 Mrad dózissal besugárzott minta.

Nyomószilárdság

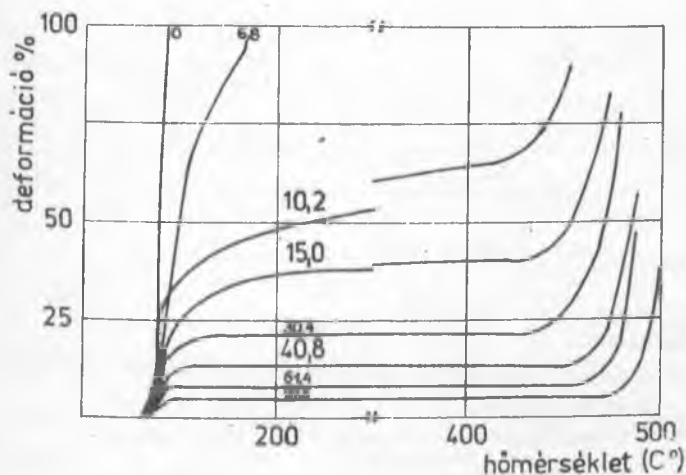
A nem terhelt polietilénminta méretének változását a hőmérséklet függvényében a 7. ábra mutatja. /A minta méretváltozását ez esetben kate-tométerrel mértük./



7. ábra

A polietilén méretváltozása a hő-mérséklettel.
B jelű minta, hossza 100 mm, D: 20 Mrad; reaktori besugárzás, a minta hossza 97 mm, D: 500 Mrad; besugárzatlan minta, hossza 99 mm.

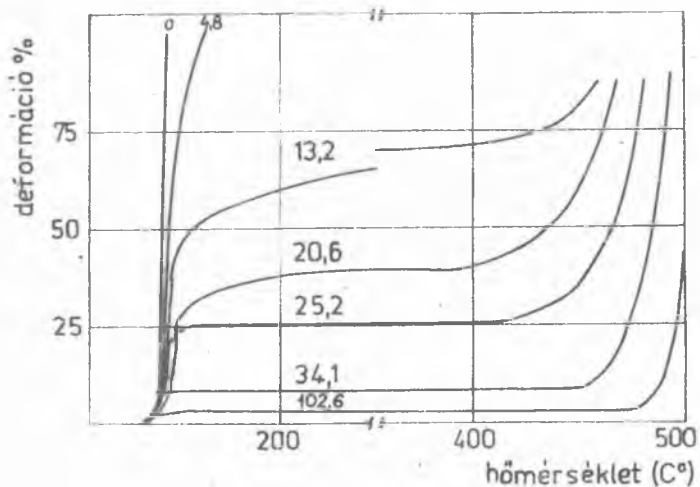
Az argonban és levegőn besugárzott minták viselkedése között ész-revehető különbségek mutatkoztak /8. és 9. ábra/; az argonban besugárzott minták adott dózis hatására szilárdabbakká válnak, mint az ugyanakkora dó-zist elnyelt, de levegőn besugárzott minták. Megfigyeléseink alapján a 15 Mrad-nál nagyobb dózissal besugárzott polietilén 136°C felett nyomó-vagy húzóerő hatására rugalmas alakváltozást szenved. Azonos terhelés mel-lett a rugalmas deformáció mértéke a lágyuláspont eléréséig állandósul /lásd 8. és 9. ábrák vízszintes szakaszait/. Mint az ábrákból is látható, a besu-



8. ábra

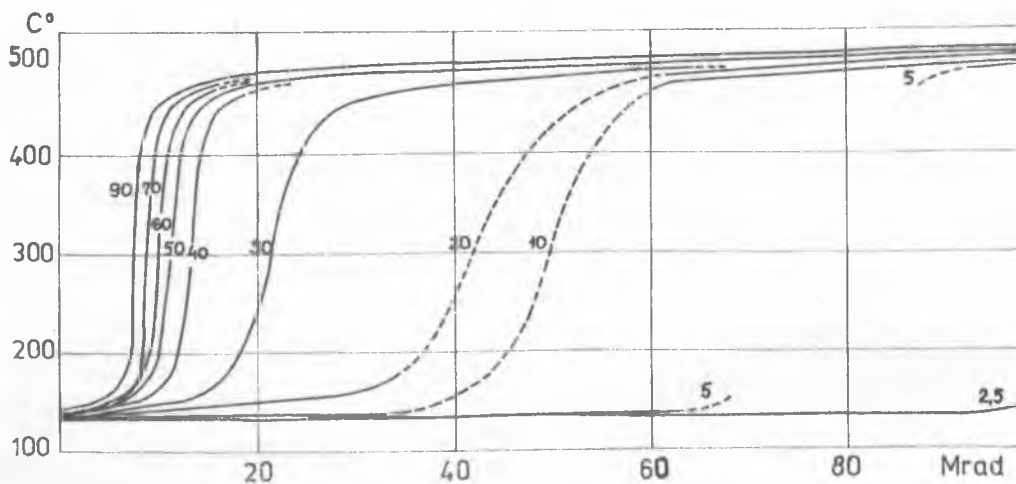
A levegőn besugárzott polie-tilénminták százalékos defor-mációja 1000 g/cm² nyomás ha-tására a hőmérséklet függvé-nyében. A görbékhez írt szá-mok az elnyelt dózis értékét jelzik Mrad-ban.

gárási dózis növelésével a polietilén "keményedik", azonos nyomóerő hatására bekövetkező rugalmas deformációja csökken. A 10. és 11. ábrákból jól látható továbbá, hogy a minták nyomás hatására bekövetkező méretváltozása mintegy 30 Mrad dózissig ugrásszerűen csökken. A kb. 30 Mrad-nál nagyobb dózist elnyelt minták már közel azonos módon viselkednek.



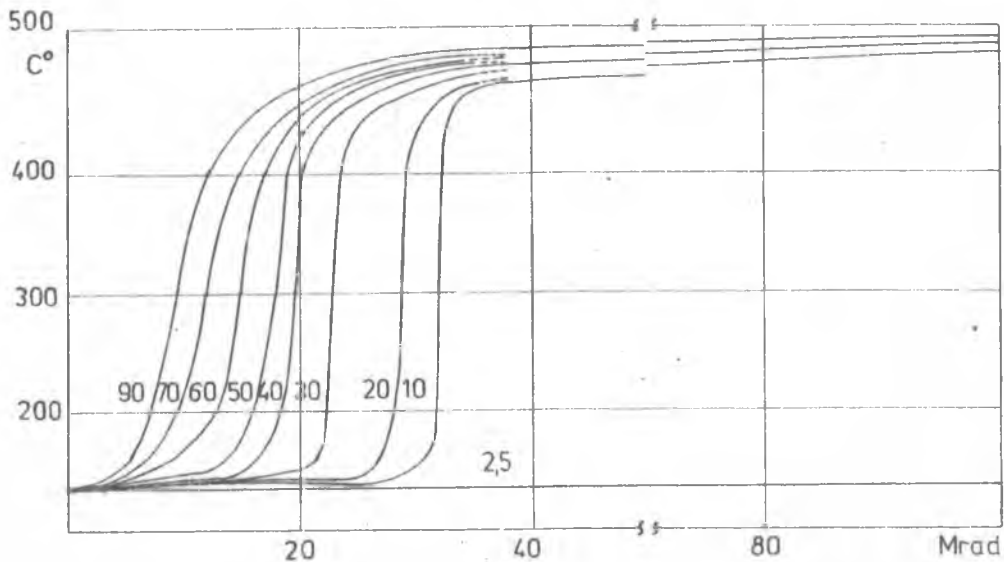
9. ábra

Az argon atmoszférában besugárzott polietilénminták százalékos deformációja 1000 g/cm² nyomás hatására a hőmérséklet függvényében. A görbékhez írt számok az elnyelt dózis értékét jelzik Mrad-ban.



10. ábra

Adott deformációk eléréséhez szükséges hőmérséklet a dózis függvényében, levegőn besugárzott mintáknál 1000 g/cm² terhelésnél. A görbék mellé írt számok a százalékos deformációt jelentik.



11. ábra

Adott deformációk eléréséhez szükséges hőmérséklet a dózis függvényében, argon atmoszférában besugárzott mintáknál 1000 g/cm^2 terhelésnél. A görbék mellé írt számok a százalékos deformációt jelentik.

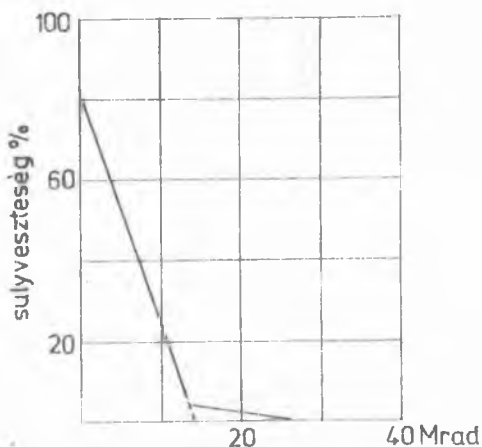
A térhálósodás

E méréseink fő célja az ún. gélpont, vagyis annak meghatározása volt, hogy mekkora dózis elnyelése szükséges ahhoz, hogy a polimert alkotó molekulák mindegyike egy-egy kötással kapcsolódjék a szomszédos molekulához. A gélpont elérése után tehát egy, csak a polietilén felületén megszakadó végtelen háló, vagyis a minta súlyának megfelelő molekulasúlyú óriás molekula jön létre. Ez a kép statisztikusan értékelendő: a gélpontban tehát átlagosan minden molekulára egy-egy molekulák közötti kötés jut. A valóságban azonban egyes molekulák több ilyen kötést tartalmazhatnak, míg a molekulák kis része egyáltalán nem kötődik a szomszédos molekulához. Várható tehát, hogy a termomechanikus tulajdonságok szűk dózistartományban még a gélpont elérése után is erősen változnak a valóságos végtelen molekulaháló kialakulásáig.

Méréseink szerint /12. ábra/ a gélpont 13-15 Mrad-nál van.

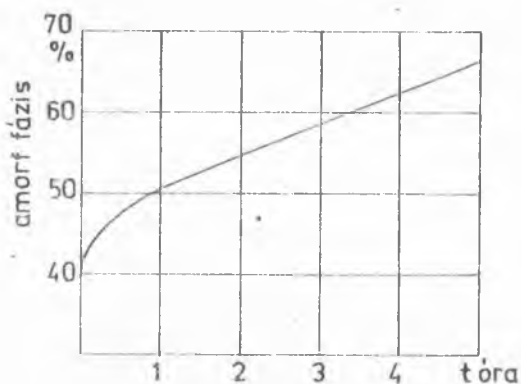
Az NMR mérések /13-15. ábrák/ szerint az amorf fázisban lévő molekulák mozgékonyasága a hőmérséklettel nő.

Az argonban gamma-sugárzással besugárzott /119,6 Mrad/ mintát 110°C -ra hevítve, majd visszahűtve szobahőmérsékletre az amorf fázis aránya ugyanaz, mint felmelegítés előtt.



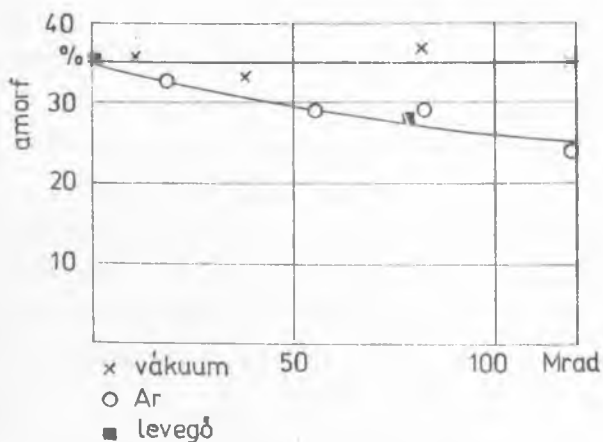
12. ábra

A polietilén súlyának változása 76,5°C hőmérsékletű CCl₄-ben 40 perc alatt, az elnyelt dózis függvényében.



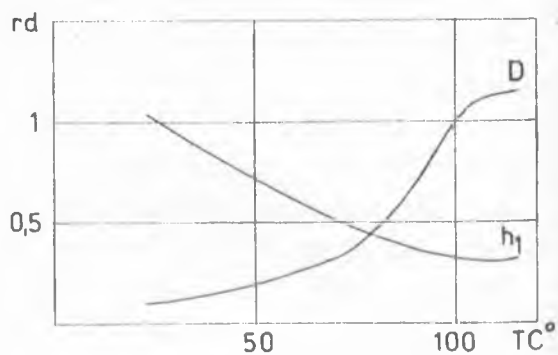
13. ábra

Reaktorban besugárzott polietilén amorf fázisának százalékos változása a besugárzási idő függvényében. Dózisteljesítmény: 100 Mrad/ó



14. ábra

⁶⁰Co gamma-sugárzással különböző atmoszférában besugárzott minták amorf fázisának mennyisége az elnyelt dózis függvényében.



15. ábra

Az amorf fázis H' mag mágneses rezonancia jelének amplitudója és szélessége a hőmérséklet függvényében, levegőn besugárzott polietilénmintán /D=117 Mrad, ⁶⁰Co-gamma-sugárzás/.

Az NMR mérések világosan mutatják a reaktori és gamma-besugárzások közötti különbségeket, valamint a védőatmoszféra hatását. Az argonban és levegőn végzett besugárzásoknál a kristályos fázis aránya a dózissal alig változik. /A 15. ábrán ez az arány gyengén növekszik. Ez a változás azonban a mérési hibahatáron belül van./

Az eredmények tárgyalása

A polietilénben nagyenergiájú ionizáló sugárzás hatására a molekulák felbomlása és térhálósodása játszódik le. A polietilén sugárkémiai stabilitása annak köszönhető, hogy e két folyamat közül igen nagy dózisos elnyeléséig a térhálósodás a döntő. Besugárzás előtt a polietilén láncok egymás közötti kapcsolata viszonylag gyenge a láncon belüli atomokat összekötő kémiai kötésekhez képest. A térhálósodás hatására az egyes láncok is kémiai kötésekkel kapcsolódnak egymáshoz, amely - egyebek között - a besugárzott anyag mechanikai és termikus tulajdonságainak megváltozását eredményezi.

Huzóerő hatására a besugárzatlan minták láncmolekulái a huzás irányának megfelelően rendeződnek [8], ami a szakítási szilárdság bizonyos mértékű növekedését okozza. Ez az átrendeződés a minta jelentős megnyulásában jut kifejezésre. Bár az általunk meghatározott gélpont 15 Mrad körül van, a termikus és mechanikus tulajdonságok kb. 30 Mrad dóziséig változnak azonos jelleggörbe szerint. Szakításkor azonban a 10-15 Mrad dózissal besugárzott minták megnyulása a legnagyobb: a kezdeti térhálósodás tehát még nem gátolja számottevően a molekulák huzás irányában történő átrendeződését, viszont a szakítással szembeni ellenállását nagymértékben fokozza. E hatások eredményeként a térhálósodás kezdeti stádiumában lévő polietilén megnyulása nagyobb a besugárzatlan polietilén megnyulásánál. Mintegy 30 Mrad elnyelés után azonban a további térhálósodás már nem okoz az előbbivel azonos változásokat; a szobahőmérsékleten mért szakítási szilárdság és a nyulás alig változik /lásd 3. és 4. ábrát/. Megemlítendő viszont, hogy a magasabb hőmérsékleteken mért szakítási szilárdság az elnyelt dózissal és a térhálósodás mértékével arányosan nő. Minél "sűrűbb" tehát a háló, annál nehezebben szakad magasabb hőmérsékleten.

Hőkezelés hatására a besugárzás során létrejött és a mikrorepedések keletkezését elősegítő szabad gyökök, ill. gázzárványok rekombináció és diffúzió révén eltűnnek a rendszerből, ami az anyag szilárdságának növelése mellett, a töltött részecskék egyidejű rekombinációja miatt a kábelszigetelésekben elektromos szempontból is kedvező eredménnyel - a vezetőképesség csökkenésével - jár.

A besugárzás során használt semleges védőatmoszféra, különösen 40-50 Mrad dózis elnyeléséig, észrevehető eltéréseket okoz a polietilén mechanikai tulajdonságaiban. Az ebben a dózistartományban levegőn besugárzott minta kevésbé ellenálló az argonban besugárzotttnál. Az ellenállás csökkenését feltehetően a minta felületi rétegeiben keletkezett oxigéntartalmu vegyületek és lyökök okozzák, amelyek elősegítik a mikrorepedések kialakulását.

Az NMR mérések szerint a reaktor kevert sugárzása azonos dózis esetén nagyobb szerkezeti változásokat idéz elő a polietilénben mint a ^{60}Co gamma-sugárzás. Ez a megfigyelésünk összhangban áll az anyag és sugárzások kölcsönhatásáról kialakult elképzelésekkel, ha figyelembe vesszük, hogy az amorf fázishoz rendelt keskeny sáv a rácshibahelyek koncentrációjával arányosan növekszik. A vákuumban gamma-sugárzásnak kitett mintákban az amorf fázis mintegy 120 Mrad dózsisig a mérési hibahatáron belül nem változik észrevehetően, következésképpen e módszer segítségével a térhálósodás mérésére nem minden esetben lehet egyértelműen következtetni.

Az argonban és levegőn gamma-sugárzással besugárzott polietilén szigetelés amorf fázisának kismértékű csökkenését feltehetőleg a besugárzást követő hőkezelés okozta, amelynek során az összetétel a magasabb kristályos fázist tartalmazó eredeti egyensúlyi állapot felé tolódott el.

Eredményeinket összefoglalva megállapítható, hogy gamma-besugárzás hatására a polietilén szigetelés termomechanikai tulajdonságai a felhasználás szempontjából kedvezően alakulnak.

I r o d a l o m

- [1] 69 kV Polyethylene Insulated Aluminium Conductor Power Cable Commercial Reality, Insulation 14, 62 /1968/
- [2] Foley, T.B.: Insulation 14, 61 /1968/
- [3] Humbel, F. F.: Wire and Wire Products 42, 262 /1967/
- [4] Chapiro, A.: Radiation Chemistry of Polymeric Systems. Intersci. Publ. New York, London 1962, p. 385
- [5] Billmeyer Jr, F.W.: Textbook of Polymer Chemistry. Intersci. Publ. New York 1957, p. 333
- [6] А. Чарлзби: Ядерные излучения и полимеры. издательство, Москва 1962. стр.202
- [7] Balla J., Tompa K., Tóth F.: Mérés és Automatika 14, 302 /1966/
- [8] Hinton, T., Rider, J.G.: J. Appl. Phys. 39, 4232 /1968/

Érkezett: 1969. júl. 25.

KFKI Közl. 17.évf. 5.szám, 1969.

MIKROMENNYISÉGŰ HIDROGÉN ÉS C₁-C₄ SZÉNHI-DROGÉNEK EGYMÁSMELLETTI MEGHATÁROZÁSA GÁZKROMATOGRÁFFAL

Irtó: Tóth László, Zádor Erika

Összefoglalás

Módszert dolgoztunk ki a szerves vegyületek sugárkémiai bomlása során keletkező mikromennyiségű H₂ és C₁-C₄ szénhidrogének egymásmel-
letti minőségi és mennyiségi meghatározására. A méréseket izoterm körülmények kö-
zött működő gázkromatográffal végeztük, szilikagél tölteten.

Bevezetés

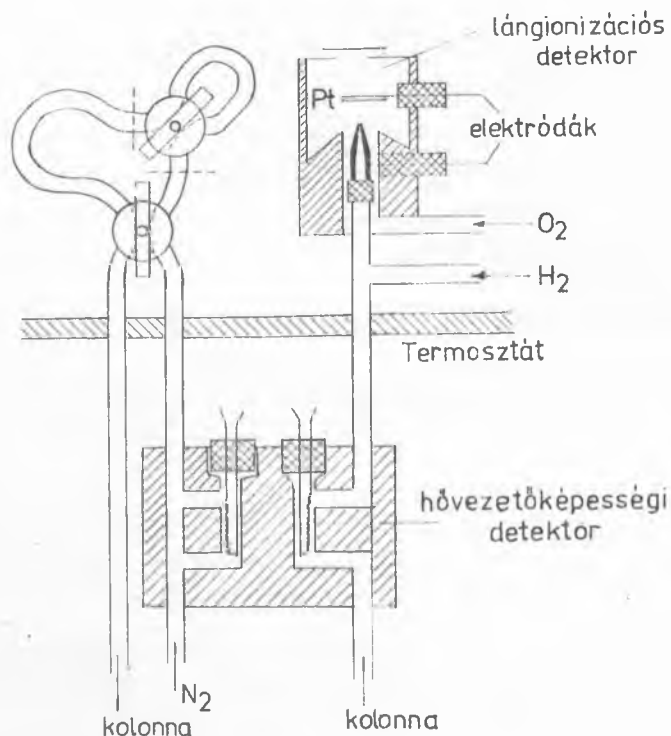
Szerves vegyületek sugárkémiai bomlása során a legtöbb esetben, a kondenzált fázisban lejátszódó átalakulások eredményeként, gázhalmazállapotú termékek is keletkeznek. Ez a gáztermék főleg hidrogénből és alacsonyabb szénatomszámú szénhidrogénekből tevődik össze. A gázfázisú termékek minőségének és mennyiségének ismeretében a sugárkémiai átalakulások természetére lehet következtetni. Mivel a legértékesebb információk a besugárzás kezdeti szakaszában, kis dózisok elnyelése után kaphatók, a viszonylag stabil vegyületek besugárzásakor a keletkező gáztermékek összes mennyisége kevés ahhoz, hogy a szokásos gázkromatográfiás módszerekkel analizálhassunk. Amennyiben a gáztermékek összterfогata kevesebb mint 10 μl, a mintavétel, valamint az elválasztó kolonnára történő adagolás komoly nehézségeket jelent. Jelent munkánkban a mintavétel, valamint a H₂, illetve C₁-C₄ szénhidrogének egymásmel-
letti meghatározásának általunk alkalmazott módszerét ismertetjük.

Az irodalomban számos adat található mind a szénhidrogének [1], mind a hidrogén [2] meghatározására. E módszerek azonban nem teszik lehetővé a hidrogén és a C₄-ig terjedő szénhidrogének együttes meghatározását izoterm körülmények között. A legnagyobb nehézséget a H₂ és CH₄ elválasztása okozza, mivel retenciós idejük a legtöbb töltetlen közel azonos. Scott [3] dezaktivált Al₂O₃ töltetet használt hidrogén-szénhidrogén elválasztásra. Breschenko, [4] dezaktivált Al₂O₃ kolonnát kapcsolt sorba "diatomic" hordozóra felvitt trietilén-glikol butirát kolonnával, a H₂ és CH₄, ill. a C₂-C₄ szénhidrogének elválasztását különböző hőmérsékleteken

végzete. Hasonlóképpen különböző hőmérsékletű elválasztást alkalmazott Papic [5] Porapak Q kolonnán és Wiley [6] 1-m hosszú szilikagél kolonnán.

A módszer ismertetése

Laboratóriumunkban fenti probléma megoldására izoterm körülmények között üzemeltethető gázkromatográfot kívántunk felhasználni. Kísérleteink során kolonnatöltetként a 250 C^o-on aktivált 60-100 mesh szemcseméretű szilikagélt találtuk a legmegfelelőbbnek. A rozsdamentes acélból készült, 4 mm belső átmérőjű kolonnákból 6 m-t töltöttünk meg szilikagéllal. A kolonnák hőmérsékletét 125 C^o±0,1 C^o-on tartottuk. A vivőgáz 40ml/perc térfogatsebességű tisztított nitrogén volt. A szétválasztott komponenseket laboratóriumunkban készített, sorosan kapcsolt hővezetőképességi detektor, és lángionizációs detektor egyidejű működtetésével érzékeltük. A hidrogén érzékelésére szolgáló hővezetőképességi detektorba 2 db, egyenként 50±0,1 ohm ellenállású kettősspirál volframszálat építettünk. Az érzékenység fokozására a mérőágot átáramlásos rendszerűre, az összehasonlító ágot részáramura készítettük /1. ábra, lent/. A szálakat 80 mA egyenárammal fűtöttük. A detektorból eltávozó gázokat rövid csővezetéken keresztül egy, a



1. ábra



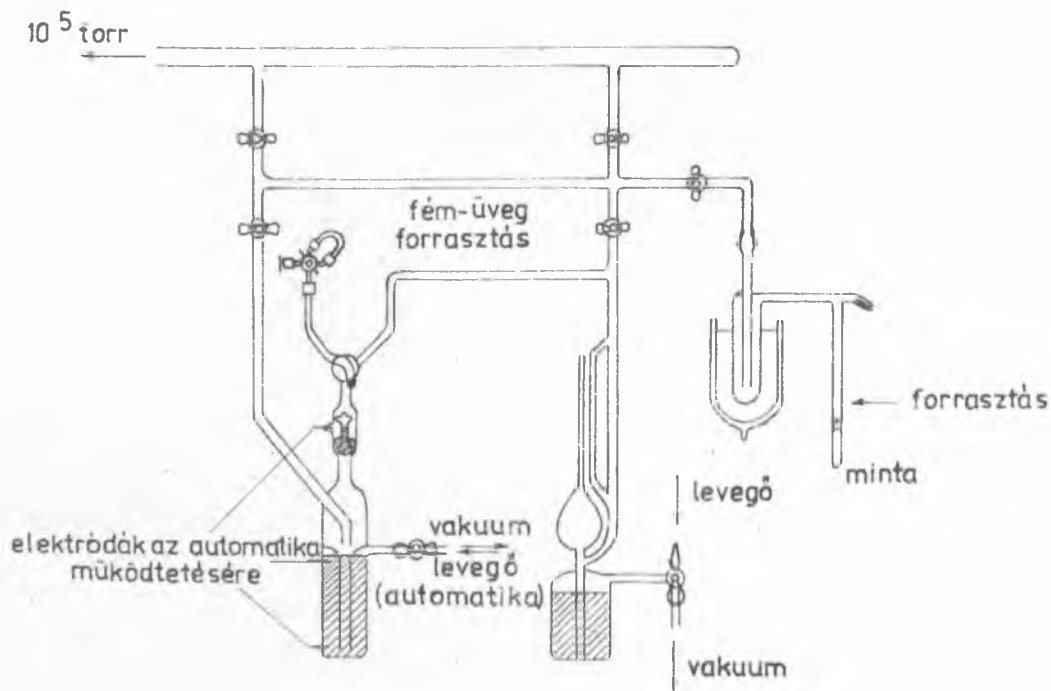
2. ábra

Gázmintavevő csap szétszerelt állapotban.

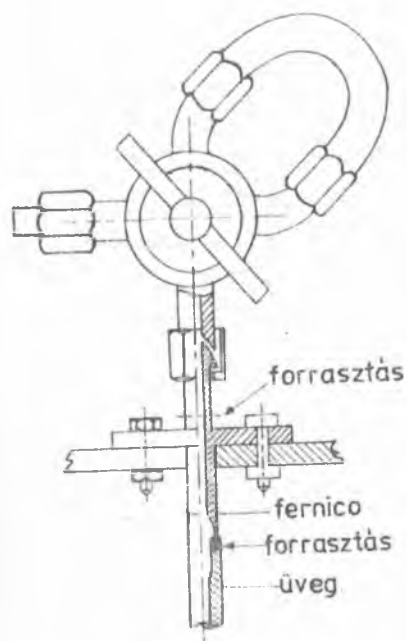
termosztáton kívül elhelyezett lángionizációs detektorba vezettük a szénhidrogén komponensek érzékelésének céljából /1. ábra/. A detektor alján lévő csatlakozáson át a nitrogén vívőgázt 50 KX jelű molekulaszűrőn tisztított hidrogénnel kevertük. A hasonló módon tisztított oxigént, az égőfej nyílása köré vezettük. A lángionizációs detektor áramát szovjet SzP-M1 típusu "Kaktusz" elektrométerrel mértük. A két detektorral kapott jeleket egy-egy 10 mV/teljes skála érzékenységgű, EPP-09, kompenzátorral regisztráltuk.

A gázminta beadagolását egy sárgarézből készült négyágú bemérőcsap /2. ábra/ segítségével végeztük. Az összezsírozott csaptesteket szilikonszírral kentük. A megfelelően elkészített bemérőcsap 10^{-5} torr-nál kisebb nyomásra is leszivatható. Az összetartozó csőcsonkokat kupos felületek illesztésével csatlakoztattuk. A hurokrész különböző térfogatra cserélhető.

A vizsgálandó mintát tartalmazó törőzáras ampullát a 3. ábrán bemutatott vákuumrendszerhez forrasztottuk. A mintavevőrendszer egy McLeod manométerből, valamint egy Toepler-szivattyúból áll, melyeket egy higanydiffúziós szivattyúval 10^{-5} torr nyomásra evakuáltunk. A gázmintavevő csap a Toepler-szivattyú nyomóágára a következő módon csatlakoztatható. A nyomóág 2 mm belső átmérőjű kapillárisához egy szilárd rögzítésű fernico ötvözetből készült, hollandi anyával ellátott csövet forrasztottunk /4. ábra/.



3. ábra



4. ábra

A gázmintavevő csap egyik ágát a csőcsonkhoz csatlakoztattuk. A csap másik ágát egy furat nélküli csatlakozással zártuk le. A csaptest megfelelő beállítása után a gázmintavevő hurokrészét, a nyomóág elágazásán keresztül 10^{-5} torr nyomásra szivattuk. A kívánt vákuum elérése után a vákuumrendszert a diffúziós szivattyú felé elzártuk, majd a mintát tartalmazó ampulla törőzárának felnyitása után a gáztermékeket a Toepler-szivattyú periodikus működtetésével a gázmintavevő csapba gyűjtöttük. A gáztermékek kvantitatív átszivatása után a Toepler-szivattyú nyomóágában a higany szintjét a kapillárison megjelölt értékre állítottuk be. Ezután a csaptest elfordításával a hurok terét zártuk, majd a csatlakozások megbontása után a mintavevő csapot a gázkromatográf megfelelő vezetékéhez kapcsoltuk. Az egyensúly beállása után a gázmintát a kolonnára öblítettük.

Kalibrációs mérések eredményei

Az egyes szénhidrogének retenciós térfogatát ismert gázok beadagolásával határoztuk meg. A mennyiségi értékelés a csucs alatti terület meghatározásával történt, előzetes kalibráció után. A hitelesítéseket hidrogénre, metánra, etilénre és acetilénre végeztük el. /Az egyes szénhidrogén sorokon belül a kapott jel nagysága a szénatomszámmal arányos [7]/. A mintavevő csapba adagolt kalibráló gázok mennyiségét a vákuumrendszerhez tartozó McLeod manométerrel mértük.

Az egyes komponensek relatív retencióját, a meghatározható mennyiség alsó határát, valamint a mérések átlagos hibáját az 1. táblázatban tüntettük fel.

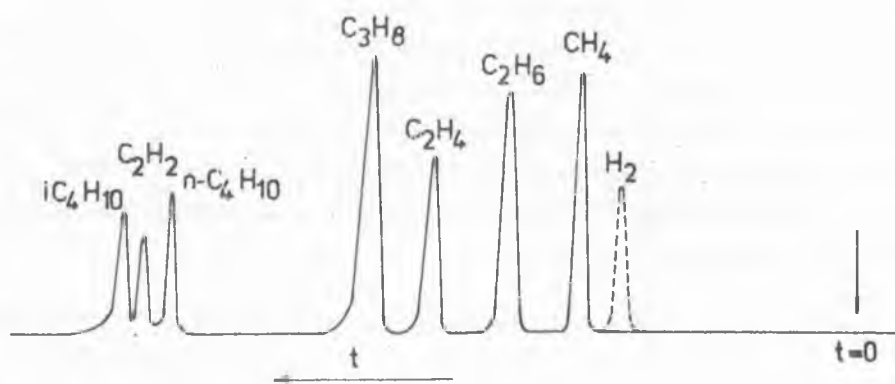
Egy jellegzetes gázkromatogram az 5. ábrán látható. A fenti módszert ipari szenek laserrel történő besugárzásakor keletkező gáztermékek vizsgálatára eredményesen alkalmaztuk [8].

Köszönetünket fejezzük ki dr. Fülöp Ferencné technikusnak a mérések gondos kivitelezéséért.

1. táblázat

Anyag	Relatív retenció CH ₄ =1,00	Meghatározható mennyiség μl	Átlagos hiba [☒] %
H ₂	0,85	4	11,6
CH ₄	1,00	0,04	22,5
C ₂ H ₆	1,27		
C ₂ H ₄	1,53	0,06	25,4
C ₃ H ₈	1,74		
n-C ₄ H ₁₀	2,48		
C ₂ H ₂	2,58	0,1	31,9
i-C ₄ H ₁₀	2,64		

[☒]A viszonylag nagy hibaszázalék a meghatározott gázkomponensek rendkívül kis mennyiségével magyarázható.



5. ábra

Irodalom

- [1] Киселев, А.В., Яшин, Я.И.: Газоадсорбционная хроматография, Наука, 1967 Москва
- [2] Jefferi, B.G., Kipping, P.J.: Gas Analysis by Gas Chromatography, Pergamon, 1964

- [3] Scott, C.G.: J. Instn. Petrol. 45, 121 /1959/
- [4] Брещенко, В.И., Иванова, Л.В., Рабинович, С.И: Нефтепереработка и Нефтехим, Научн-Техн. Сбор. I 37 (1965)
- [5] Papic, M.: J.Gas Chromatogr. 6, 493 /1968/
- [6] Wiley, R.H., Veeravagn, P.: J. Phys. Chem. 72, 2417 /1968/
- [7] Ettre, L.S., Zlatkis, A.: The Practice of Gas Chromatography, Interscience 1967, New York
- [8] Kósa Somogyi I., Zádor E.: Hazai barnaszemek lasersugárral történő szárazlepirálásának vizsgálata. KFKI kutatói jelentés. Budapest, 1968.

Erkezett: 1969.jun. 23.

KFKI Közl. 17.évf 5.szám, 1969.

MEGJEGYZÉSEK A BESSEL-FÜGGVÉNYEK GYÖKEINEK CSEBISEV-SORFEJTÉSÉHEZ

Irta: Németh Géza

Összefoglalás

A dolgozatban a $J_\nu(x)$ Bessel-függvények gyökeinek kiszámításához Csebisev-sorfejtések segítségével polinom közelítéseket adunk meg. A $\nu=0, 1, 1/3, 2/3, 1/4, 3/4$ indexek esetére a sorok együtthatóit 15 decimális jegy pontosságig számítottuk ki.

1. Bevezetés

Egy - Gyorsító Laboratóriumtól származó - feladat kapcsán táblázatot készítettünk az

$$F(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin xt}{t I_0(t)} dt$$

integrál értékeire, ahol

$$I_0(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(t/2)^{2k}}{k!^2}$$

az un. módosított Bessel-függvény. Az integrálra alkalmazva a reziduum tételt $F(x)$ exponenciális sorba fejthető:

$$F(x) = 1 - \sum_{k=1}^{\infty} c_k e^{-\rho_k x}, \quad \text{ahol} \quad c_k = 2/(\rho_k J_1(\rho_k)),$$

és ρ_k a $J_0(x)$ Bessel-függvény k -ik gyöke. A fenti sor gyorsan konvergál, hacsak nem kicsi az x értéke. Ez utóbbi esetben szükség van a ρ_k számok nagy pontosságú meghatározására. Hasonló típusú Bessel-függvények gyökeit tartalmazó függvénysorok más technikai feladatokban is előfordulnak. Az ilyen számítások megkönnyítésére a ρ_k számok kiszámításához adunk meg nagy pontosságú polinom közelítéseket.

2. Bessel-függvények gyökeinek néhány sajátága

Ismeretes, hogy a

$$J_\nu(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{(x/2)^{2k+\nu}}{\Gamma(\nu+k+1)k!}$$

Bessel-függvénynek a pozitív valós tengelyen végtelen sok zéró helye létezik. Az $x=0$ -tól egyre messzebb levő szomszédos gyökök távolsága π -hez tart: v.ö. pl. [1] .

McMahon 1894-ben formális eljárást adott meg az n -ik x_n gyök sorfejtéses előállítására

$$x_n \sim \beta - \sum_{k=0}^{\infty} c_k \frac{1}{\beta^{2k+1}} \quad , \quad \beta = \left(n + \frac{\nu}{2} - \frac{1}{4}\right)\pi \quad /1/$$

Bebizonyították, hogy a McMahon sor - bár általában^{*} minden n -re és ν -re divergens - megadja a gyök Poincare értelemben vett aszimptotikus kifejtését $n \rightarrow \infty$ esetére. Azonkívül azt tapasztalták, hogy a sor első néhány tagjával bizonyos pontosság elérhető a gyökök kiszámításánál, ezért a McMahon sor gyakran került alkalmazásra. A sor első hét tagja [1]-ben meg van adva.

A következőkben egy rekurziós módszert mutatunk be a c_k együtthatók számítására. Tekintsük először $J_\nu(x)$ alábbi előállítását:

$$J_\nu(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \left\{ P_\nu(x) \cos\left(x - \frac{\nu}{2}\pi - \frac{\pi}{4}\right) - Q_\nu(x) \sin\left(x - \frac{\nu}{2}\pi - \frac{\pi}{4}\right) \right\} \quad /2/$$

ahol

$$P_\nu(x) = \frac{\sqrt{2/\pi}}{\Gamma(\frac{1}{2} + \nu)\Gamma(\frac{1}{2} - \nu)} \int_0^\pi \eta^{-1/2} e^{-\eta} K_\nu(\eta) \frac{1}{1+\eta^2/x^2} d\eta \quad /3/$$

^{*} A McMahon sor $\nu = \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \frac{7}{2}, \dots$ értéknél minden n -re konvergál: [2] .

$$Q_\nu(x) = \frac{\sqrt{2/\pi}}{\Gamma(\frac{1}{2} + \nu)\Gamma(\frac{1}{2} - \nu)} \int_0^\infty \eta^{-1/2} e^{-\eta} K_\nu(\eta) \frac{\eta/x}{1+\eta^2/x^2} d\eta \quad /4/$$

A P_ν és Q_ν függvényeket $1/x$ hatványai szerint sorbafejtve

$$P_\nu \cong 1 - \frac{(4\nu^2-1)(4\nu^2-9)}{2!(8x)^2} + \frac{(4\nu^2-1)(4\nu^2-9)(4\nu^2-25)(4\nu^2-49)}{4!(8x)^4} + \dots \quad /5/$$

$$Q_\nu \cong \frac{4\nu^2-1}{8x} - \frac{(4\nu^2-1)(4\nu^2-9)(4\nu^2-25)}{3!(8x)^3} + \dots \quad /6/$$

ismert divergens sorokat kapjuk.

Látható, a /2/ egyenletből, hogy $x=x_n$ helyettesítésénél

$$\operatorname{tg}\left(x_n - \frac{\nu\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right) = \frac{P_\nu(x_n)}{Q_\nu(x_n)} \quad /7/$$

kell, hogy fennálljon. Legyen $u = \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\left(m+\frac{\nu-1}{4}\right)\pi}$ és $x_n = \frac{1}{u} - \varepsilon$.

Ekkor nyilván $\varepsilon \rightarrow 0$, $n \rightarrow \infty$. Fennáll, hogy

$$\operatorname{tg}\varepsilon = \frac{Q_\nu}{P_\nu} \Big|_{x_n = \frac{1}{u} - \varepsilon} \quad /8/$$

Ebből inverzre térve differenciálás után kapjuk:

$$\frac{d\varepsilon}{du} = \varepsilon' = -\left(\frac{1}{u^2} + \varepsilon'\right) \frac{P_\nu Q_\nu' - P_\nu' Q_\nu}{P_\nu^2 + Q_\nu^2} \quad /9/$$

A Bessel-függvények ismert tulajdonságából következik, hogy

$$P_\nu Q_\nu' - P_\nu' Q_\nu = 1 - \left(P_\nu^2 + Q_\nu^2\right) = 1 - F_\nu \quad /10/$$

Itt F_ν integrállal és aszimptotikus sorával megadva a következő:

$$F_\nu = \frac{2}{\Gamma(\frac{1}{2} + \nu)\Gamma(\frac{1}{2} - \nu)} \int_0^\infty K_{2\nu}(\eta) \left(1 + \frac{\eta^2}{4x^2}\right)^{-1/2} d\eta \sim {}_3F_0\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}-\nu, \frac{1}{2}+\nu; -\frac{1}{x^2}\right). \quad /11/$$

A /10/ relációt /9/-be helyettesítve kapjuk ϵ differenciálegyenletét:

$$\epsilon' = \frac{1}{u^2} (F_\nu - 1) \quad , \quad F_\nu = F_\nu(x), \quad x = \frac{1}{u} - \epsilon \quad , \quad /12/$$

A /12/ reláció egy nem analitikus jobboldalu nem lineáris differenciálegyenlet. Lényegében ekvivalens a Watson által megadott integrodifferenciálegyenlettel v.ö. [3] .

A /12/ egyenletből látható, hogy az $\epsilon(u)$ függvény

$$\epsilon(u) \sim \sum_{k=0}^{\infty} c_k u^{2k+1} \quad , \quad u \rightarrow 0 \quad . \quad /13/$$

sorba fejthető. A c_k együtthatók kiszámítására az együtthatók összehasonlításának módszerével az alábbi rekurzív egyenleteket kapjuk:

$$(2k + 1) c_k = f_{k+1} + \sum_{j=0}^{k-1} d_{k-j}^{(2j+2)} f_{j+1} \quad , \quad k = 1, 2, \dots$$

$$f_k = (-1)^k \frac{(1/2)_k \left(\frac{1}{2} - \nu\right)_k (1/2 + \nu)_k}{k!} \quad /14/$$

$$d_{n+1}^{(2j)} = 2j c_n + \sum_{\ell=1}^n d_\ell^{(2j)} c_{n-\ell} \left\{ 2j - \frac{(2j-1)}{n+1} \ell \right\} \quad , \quad \begin{matrix} n = 1, 2, \dots \\ j = 1, 2, \dots \end{matrix}$$

Sorban egymásután megoldva ezeket az egyenleteket kapjuk:

$$\begin{aligned} c_0 &= f_1 \\ 3c_1 &= f_2 + 2c_0 f_1 \\ 5c_2 &= f_3 + 4c_0 f_2 + 2c_1 f_1 \\ &\dots \end{aligned}$$

A /14/ egyenletek megoldására az I.C.T. 1905 számológépen programot állítottunk össze. E program segítségével határoztuk meg a gyökök sorfejtésének együtthatóit. A $v = 0$ esetben az első 30 együttható a következő:

k	c_k	k	c_k
0	-0.1250000000000000/0/	15	0.393398322758715/23/
1	0.8072916666666667/1/	16	-0.975557486437697/25/
2	-0.2460286458333333/0/	17	0.273627614749282/28/
3	0.182443876720610/1/	18	-0.861884275450897/30/
4	-0.253364147973439/2/	19	0.302939671140212/33/
5	0.567644412135183/3/	20	-0.118142274510361/36/
6	-0.186904765282321/5/	21	0.508586992003050/38/
7	0.849353580299149/6/	22	-0.240555310709672/41/
8	-0.509225462402227/8/	23	0.124484519722840/44/
9	0.389364786665649/10/	24	-0.702078598603711/46/
10	-0.369770254203949/12/	25	0.430015540367309/49/
11	0.426979430874373/14/	26	-0.285095842094772/52/
12	-0.589123189242600/16/	27	0.203983235871617/55/
13	0.957189969452374/18/	28	-0.157065138492412/58/
14	-0.180888840601061/21/	29	0.129812888833558/61/

A számok után zárójelben álló szám mutatja, hogy 10 hányadik hatványával kell a táblázatbeli számot szorozni.

Az együtthatók láthatóan erősen növekszenek. Empirikusan megvizsgáltuk a c_k számok viselkedését. A $|c_{k+1}/c_k|$ számokra $k=23$ -tól $k = 28$ -ig az alábbi differencia táblázat nyerhető /10 jegyre/:

$ c_{k+1}/c_k $	Δ	Δ^2	Δ^3
563.9886792	48.5004939		
612.4891731	50.5004524	2.0000415	-5.0/-6/
662.9896255	52.5004159	2.0000365	-4.1/-6/
715.4900414	54.5003835	2.0000324	-4.0/-6/
769.9904249	65.5003551	2.0000284	
826.4907800			

Ebből empirikusan levonható az a következtetés, hogy $|c_{k+1}/c_k|$ k másodfoku polinomjával jól közelíthető, ami $|c_k|$ -ra azt jelenti, hogy körülbelül $(k!)^2$ típusan növekszik $k \rightarrow \infty$ esetre.

3. A gyökök Csebisev-sorfejtése

Az $\varepsilon(u)$ függvény Csebisev-polinomok szerinti sorfejtésével főfunk a következőkben foglalkozni. Egy ilyen sorfejtés konvergenciájához nem szükséges az analitikusság. Elegendő például az akárhányszori differenciálhatóság a vizsgált intervallum belsejében. Ez a feltétel pedig $\varepsilon(u)$ /12/ differenciálegyenletéből leolvashatóan teljesül. Ezért elvileg eleve biztosított az

$$x_n = \beta[1 - u \varepsilon(u)] = \beta \sum_{k=0}^{\infty} p_k^{(v)} T_{2k}(u/a), \quad 0 \leq u \leq a \quad /15/$$

sorfejtés konvergenciája. Itt "a" egy alkalmasan választott paraméter, melynek rögzítése esetén a /15/ sor $0 \leq u \leq a$ intervallumban állítja elő a gyököket. Mivel $n=1$ -re $u=u_1 = \left\{ \left(\frac{v}{2} + \frac{3}{4} \right) \pi \right\}^{-1}$ vehető $a = u_1$. Ekkor a /15/ sor az összes gyököt megadja, mert $u \leq u_1$. A /15/ sorfejtés $p_k^{(v)}$ együtthatóinak kiszámításához az előző részben említett empirikus megjegyzés adta az ötletet. Ha ugyanis $\frac{1}{u} \varepsilon(u)$ úgy viselkedik mint a

$$\phi(u) = {}_3F_0(1, 1, 1; -u^2)$$

függvény, akkor elkészítve $\phi(u)$ polinomközelítését

$$\phi_N(u) = \sum_{j=0}^N \phi_j u^{2j} - t$$

majd ennek ϕ_j együtthatóját a $\rho_j = (-1)^j \frac{c_j}{j!^2}$ /empirikusan lassan változó/ faktorról szorozva $\varepsilon(u)$ közelítését nyerhetjük:

$$\varepsilon(u) \sim u \sum_{j=0}^N \phi_j \rho_j u^{2j}$$

Ezt a polinomot a szokásos konverziós eljárással átírva Csebisev-polinomok szerint haladó sorba kapjuk $p_k^{(v)}$ értékét. Mivel az elmondottak nem bizonyító jellegűek exakt aritmetikailag, kétféle ellenőrzést is végeztünk a $p_k^{(v)}$ számokra.

ΤΑΒΕΛΑΖΑΤΟΚ

$J_0(x_n) = 0 .$	
$x_n = \left(n - \frac{1}{4}\right)\pi \sum_{k=0}^{\infty} P_k T_{2k}\left(\frac{3}{4n-1}\right), n=1,2,\dots$	
k	P_k
0	1.0105221391817
1	0.0103066190950
2	-. 2008063971
3	. 129760553
4	-. 14524544
5	. 2268218
6	-. 443574
7	. 102105
8	-. 26614
9	. 7655
10	-. 2386
11	. 795
12	-. 281
13	. 104
14	-. 40
15	. 16
16	-. 7
17	. 3
18	-. 1
19	. 1

$J_0(x_n) = 0 .$		$J_1(x_n) = 0 .$	
$x_1 = 2.40482 55576 95773$		$x_1 = 3.83170 59702 07512$	
$x_n = \left(n - \frac{1}{4}\right)\pi \sum_{k=0}^{\infty} P_k T_{2k}\left(\frac{7}{4n-1}\right), n=2,3,\dots$		$x_n = \left(n + \frac{1}{4}\right)\pi \sum_{k=0}^{\infty} P_k T_{2k}\left(\frac{9}{4n+1}\right), n=2,3,\dots$	
k	P_k	k	P_k
0	1.002036985722446	0	0.996250367814887
1	0.002027075321031	1	-.003748711522553
2	-. 9710742159	2	. 874146145
3	. 191316349	3	-. 45222528
4	-. 7788831	4	. 1230932
5	. 503432	5	-. 58686
6	-. 44795	6	. 3897
7	. 5041	7	-. 333
8	-. 680	8	. 35
9	. 106	9	. 4
10	-. 19	10	. 1
11	. 4		
12	-. 1		

$J_{1/3}(x_n) = 0$		$J_{2/3}(x_n) = 0$	
$x_1 = 2.902586248416952$		$x_1 = 3.375610652693620$	
$x_n = \left(n - \frac{1}{12}\right) \pi \sum_{k=0}^{\infty} P_k T_{2k} \left(\frac{23}{12n-1}\right), n=2, 3, \dots$		$x_n = \left(n + \frac{1}{12}\right) \pi \sum_{k=0}^{\infty} P_k T_{2k} \left(\frac{25}{12n+1}\right), n=2, 3, \dots$	
k	P_k	k	P_k
0	1.000946843846881	0	0.998872478011580
1	0.000943341221180	1	-0.001125159556927
2	-0.3442863912	2	0.2326607338
3	0.57574197	3	-0.34648150
4	-0.2058423	4	0.1113429
5	0.118562	5	-0.57921
6	-0.9495	6	0.4212
7	0.970	7	-0.393
8	-0.119	8	0.44
9	0.17	9	-0.5
10	-0.2	10	0.1

$J_{1/4}(x_n) = 0$		$J_{3/4}(x_n) = 0$	
$x_1 = 2.780887723994978$		$x_1 = 3.491008374108422$	
$x_n = \left(n - \frac{1}{8}\right) \pi \sum_{k=0}^{\infty} P_k T_{2k} \left(\frac{15}{8n-1}\right), n=2, 3, \dots$		$x_n = \left(n + \frac{1}{8}\right) \pi \sum_{k=0}^{\infty} P_k T_{2k} \left(\frac{17}{8n+1}\right), n=2, 3, \dots$	
k	P_k	k	P_k
0	1.001334263001043	0	0.998255907449138
1	0.001328870159913	1	-0.001741214116688
2	-0.5296843563	2	0.2833822664
3	0.92370977	3	-0.43181723
4	-0.3406346	4	0.1355525
5	0.201685	5	-0.68865
6	-0.16569	6	0.4893
7	0.1732	7	-0.446
8	-0.218	8	0.49
9	0.32	9	-0.6
10	-0.5	10	0.1
11	0.1		

Először megvizsgáltuk a módszer numerikus stabilitását. Azt találtuk, hogy N különböző értékeivel $N = 10, 15, 20, 25, 30$ végezve el az egész számítás /a növekvő pontosságtól eltekintve/ ugyanazokat a $P_k^{(v)}$ számokat kapjuk. Továbbá a kész polinom sorfejtést 15 decimális jegy pontosságig csonkítva az adódó polinom segítségével kiszámítottuk a gyököket és összehasonlítottuk Olver [1] táblázatával. Az egyezés megfelelő volt.

4. Táblázatok

Néhány esetre kiszámítottuk a Csebisev-sorfejtés együtthatóit ($v = 0, 1, \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}$). A $v = 0$ esetnél azt találtuk, hogy a sor konvergenciája erősen javul, ha az első gyököt nem a sorból számítjuk. Ezért a $v \neq 0$ esetekre az első gyököt külön adjuk meg, a többi pedig a sorfejtésből számítható. Megjegyezzük még, hogy az $Y_v(x)$ függvény gyökei eltekintve az első vagy az első két gyöktől ugyanebből a sorfejtésből nyerhetők, csak más argumentummal kell dolgozni v.ö.: [4] .

I r o d a l o m

- [1] Olver, F.W.J.: Royal Society Mathematical Tables. Vol. 7,
Cambridge University Press. Cambridge. England /1960/
- [2] Németh, G.: Szférikus Bessel-függvények gyökeinek Csebisev-sorfejtése /Publikálás alatt/.
- [3] Watson, G.N.: A treatise on the theory of Bessel-functions.
Cambridge University Press. Cambridge. England /1958/
- [4] Stegun, I., Abramovitz, M.: Handbook of Mathematical Functions.
National Bureau of Standards, Washington /1967/ 371 o.

Érkezett: 1969. júl. 24.

KFKI Közl. 17.évf. 5.szám, 1969.

ALACSONY FORRÁSPONTU FOLYADÉKOKNÁL ALKALMAZOTT KONDEZÁCIÓS SZINTÉRZÉKELŐK ELMÉLETI VIZSGÁLATA

Irta: Balla János

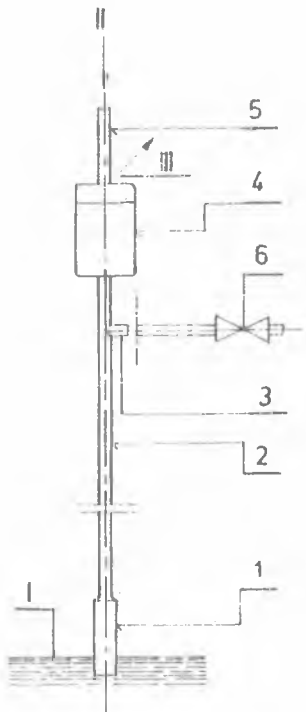
Összefoglalás

Az alacsony forráspontu cseppfolyósított gázok / CH_4 , O_2 , N_2 , Ne , H_2 és He / szintmagasságának jelzése és szabályozása a tudományos kutatás és az ipari termelés területén napi feladatként jelentkezik. Az egyszerű felépítésű kondenzációs szintszabályozók alkalmazása a kutatásoknál gyakran előforduló speciális környezeti hatások /pl. igen alacsony hőmérsékletek, nagy mágneses tér jelenléte stb./ és a biztonságos működéssel szemben támasztott követelmények miatt különösen indokolt. Ismertetjük e szabályozók szintérzékelőinek elméleti vizsgálatára kidolgozott módszereinket, és a kapott eredményeket mért adatokkal hasonlítjuk össze.

Kondenzációs szintszabályozók szerkezete és működése

A két legegyszerűbb megoldást mutatjuk be: a segédenergia nélkül működő kétállású szabályozót /1. ábra/, és az ugyancsak kétállású elektromos szintszabályozó jelátvivő tagját /2. ábra/. A segédenergia nélkül működő egyszerű kétállású szabályozó kivánt folyadékszintre /I/ beállított érzékelőjét /1/ kapilláriscső /2/ közti össze a szobahőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson lévő csőmembrános gázszeleppel. A kapilláriscső /2/ a burkolatban /4/ elhelyezett membrán rögzített végéhez csatlakozik. A csőmembrán elmozduló végére a beavatkozó szervet képező gázszelep záróelemét forrasztjuk, a gáztömlő csatlakoztatására /II/ és a szállítódényből elpárolgó gáz áteresztésére /III/ szolgáló szelepüléket /5/ belső csavarmenttel rögzítjük a burkolathoz /4/. A szabályozó belső zárt terét hideghegesztéssel való lezárás esetén a lágy réz kapilláriscsövön /3/, oldható lezárás esetén pedig egy túszelepen /6/ keresztül töltjük meg munkaközeggázzal.

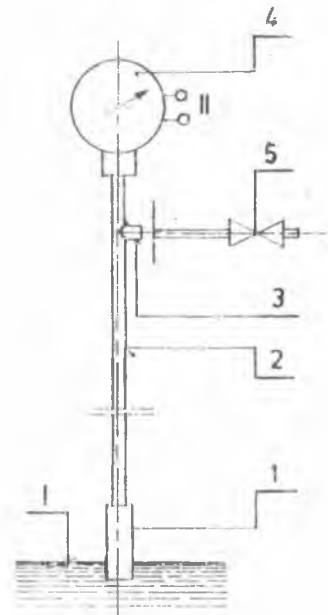
Az elektromos jelátvivő-tagnál az érzékelővel /1/ összekötött kapilláriscső /2/ kontaktmanométerhez /4/ csatlakozik, amely a beavatkozó szervként alkalmazott elektromágneses működésű folyadék- és gázszelepeket vezérli. A jelátvivő tag belső zárt terének megtöltését az előbbihez hasonlóan lehet elvégezni.



1. ábra

A kondenzációs szintszabályozó szerkezete.

1 - szintérzékelő; 2 - kapilláriscső; 3 - töltőcső; 4 - burkolat; 5 - szelepvélék; 6 - túszelep.
I - szabályozott folyadékszint;
II - gáztömlő csatlakozás a szállítóedény párologtató csonkjától; III - a gáz kiáramlása a szabadba.



2. ábra

A kondenzációs jelátvivő-tag szerkezete.

1 - szintérzékelő; 2 - kapilláriscső; 3 - töltőcső; 4 - kontaktmanométer; 5 - túszelep.
I - szabályozott folyadékszint;
II - elektromos csatlakozás a jeladóhoz vagy a beavatkozó szervhez.

A szintszabályozó szerkezeti felépítését, a munkaközeg-gáz anyagát és töltési nyomást a szabályozási feladat szerint kell megválasztani. Ezek a tényezők ugyanis a szabályozó működését, a szabályozási eltérés nagyságát és a stabilitást alapvetően befolyásolják. A számításba jövő közegpárok /szabályozott felszínű kriogén folyadék és a megfelelő munkaközeg-gáz/ fizikai állandóit és gőznyomásgörbéit [1] tartalmazza.

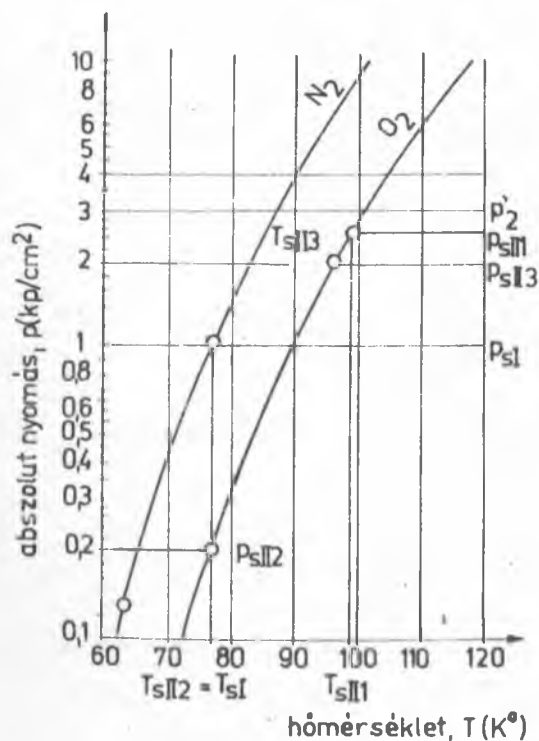
A belső zárt térrel összekötött szintérzékelőben a munkaközeg-gáz kondenzálódása vagy elpárolgása az érzékelő, valamint a kriogén folyadék, illetve a gőz közötti hőátadás különbsége miatt történik. Az érzékelőben kondenzált munkaközeg szintmagassága megközelítően a szabályozott folyadékszinttel azonos.

A folyadékszint csökkenésekor a meleg környezettel összekötött kapilláriscsővön keresztül beáramló hő hatására az érzékelőben lévő fo-

lyadék párologni kezd, és a belső rendszer nyomása a magasabb hőmérsék-
lethez tartozó telítési nyomásig nő meg. Állandó hőbevezetés mellett a
teljes folyadékmennyiség rövid idő alatt elpárolog. A fázisváltás követ-
keztében a belső tér nyomása ugrásszerűen megemelkedik, amely után a to-
vábbi felmelegedés mértékének megfelelő nyomásnövekedés lép fel.

A műszer $v_M[\text{cm}^3]$ belső zárt terét kitöltő munkaközeg-gáz töme-
gének túlnyomó része a szobahőmérsékletű falakkal határolt szakaszt fog-
lalja el. Ezért a kondenzálódás előtt kicsiny a töltőgáz hőmérsékletcsök-
kenéséből adódó nyomáscsökkenés, a folyadék elpárolgása után pedig a keletke-
zett gáz a jó hőcsere miatt igen rövid időn belül környezeti hőmérséklet-
re melegszik. Megjegyezzük, hogy a munkaközeg-gáz nyomásváltozása követ-
keztében a belső tér $v_M[\text{cm}^3]$ térfogata a teljes állapotváltozás alatt
az 1. ábra szerinti kétállású szabályozónál kb. 20 ... 25 %-os változást
sz szenved, míg a 2. ábra szerinti elektromos jelátvivőnél gyakorlatilag
változatlan marad.

Az elmondottakra vonatkozó példát - atmoszférikus nyomáson párol-
gó folyékony nitrogén szintjének szabályozását $p'_2 = 3$ ata töltési nyomá-
su oxigén munkaközeggel működő műszerrel - a 3. ábra szemlélteti. A folyé-
kony nitrogén fizikai jellem-



3. ábra

Az oxigén és a nitrogén gőznyomásgörbéje.

zőit I-es, az oxigén munkakö-
zegét pedig II-es indexxel je-
lölve láthatjuk, hogy a belső
 O_2 rendszer folyadékállapota a
gőznyomásgörbének a kritikus
pont és a hármaspont közötti
szakaszára esik. A kondenzá-
ció kezdeti hőmérséklete a p'_2
töltési nyomás és a kondenzá-
lódás előtti lehülésből adódó
nyomáscsökkenés által megsza-
bott p_{sIII} telítési nyomás-
hoz tartozó T_{sIII} egyensúlyi
hőmérséklet. A kondenzálódás
befejezésekor a cseppfolyós
 O_2 munkaközeg hőmérséklete a
szabályozott felszínű folyé-
kony nitrogén $p_{sI} = 1$ ata

telítési nyomáshoz tartozó T_{SI} hőmérsékletével azonos: $T_{SII2} = T_{SI} = 77,36 \text{ K}^{\circ}$. A munkaközeg egyensúlyi nyomása: $p_{SII2} = 0,2 \text{ ata}$.

A rugóerő nélküli folyadékszint-szabályozók biztonságos működésének feltétele, hogy a töltőgázt tartalmazó belső rendszer nyomása megfelelő értékkel térjen el az atmoszférikus nyomástól. A negatív nyomáskülönbség $T_{SII2} = T_{SI}$ feltétel teljesülésével igen rövid idő alatt és igen biztonságosan előállítható. A pozitív nyomáskülönbség előállításához a szintérzékelő és az O_2 munkaközeg hőmérsékletét T_{SII2} értékről elfogadhatóan rövid idő alatt T_{SII3} értékig, tehát kb. 20 K° -kal kell növelni. Ennek érdekében megfelelő hőbevitelt kell biztosítanunk, amelyet a kapilláriscső hővezetési tényezője, hővezető keresztmetszete, hossza és a hőátadási tényezők alapvetően befolyásolnak.

A szintérzékelő hőtani vizsgálata

A szintérzékelő vizsgálatánál feltételezzük, hogy

- a./ a munkaközeg kondenzálódása a szabályozott felszínü kriogén folyadék telítési hőmérsékletéhez tartozó egyensúlyi nyomáson fejeződik be;
- b./ a szabályozott felszínü folyadékban és a hőérzékelőben lévő kondenzátumban - a keveredés és az áramlás következtében - a fürdő minden helyén állandó, a telítési nyomáshoz tartozó egyensúlyi hőmérséklet uralkodik.

Az érzékelők szerkezeti megoldása különböző lehet.

- A./ Legegyszerűbb az a megoldás, amelynél a kapilláriscső /2/ zárt alsó szakasza képezi az érzékelőt.
- B./ Az érzékelő /1/ a kapilláriscső /2/ alsó végéhez forrasztott külön szerkezeti elem.

Megjegyezzük, hogy mindkét esetben - főleg atmoszférikusnál nagyobb nyomáson intenzíven párolgó kriogén folyadékoknál - a munkaközeg fázisváltásához /elpárolgásához/ szükséges hőbevezetés biztosítására a kapilláriscső elektromos fűtéséről kell gondoskodni.

A kapilláriscső és az intenzív párolgású folyadékfürdő felett áramló hideg gőz között fellépő nagy hőátadást megfelelő módszerekkel mi-

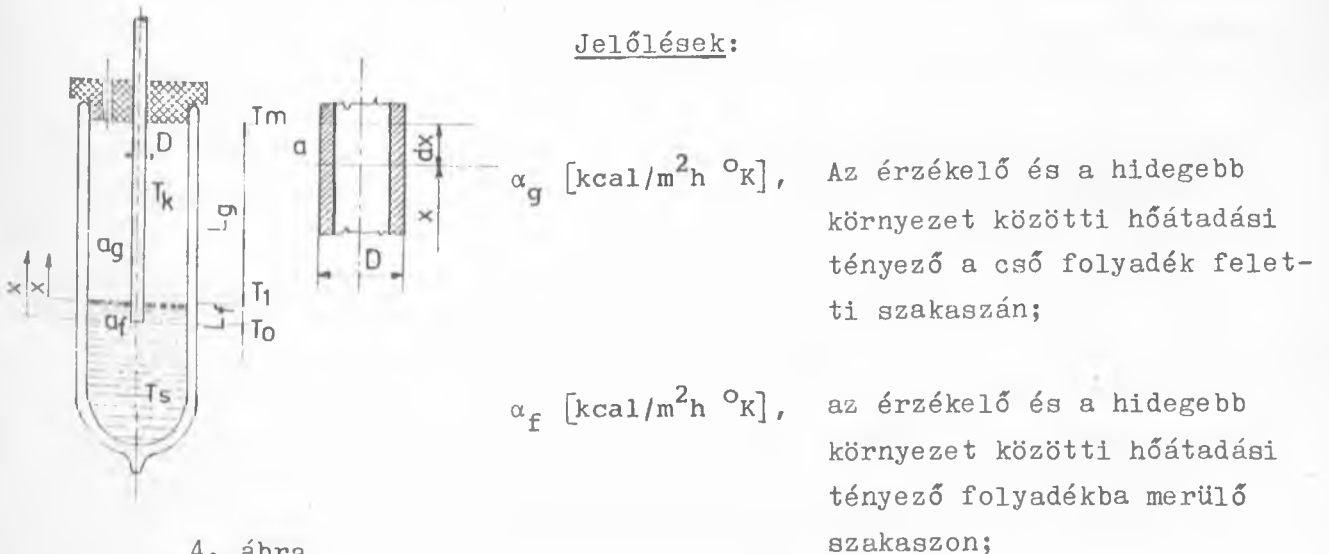
nimumra csökkenthetjük. Ezt a lehetőséget azonban jelen tárgyalásainknál nem vesszük figyelembe, és az elméleti vizsgálatot a szintérzékelő legnehezebb üzemviszonyaira vonatkozóan végezzük el.

Az érzékelő termikus egyenleteinek levezetésével az alábbi kérdésekre kívánunk választ kapni:

- 1./ Folyadékba merülő érzékelőnél $L_f = 0,5 \dots 15 D$ merülési mélység mellett /ahol L_f [m] a merülési mélység, D [m] a hőérzékelő külső átmérője/ milyen körülmények között történik az érzékelő lehülése és a töltőgáz kondenzálódása.
- 2./ A folyadék felszine felett $x = 0 \dots 1,5 D$ távolságban elhelyezkedő érzékelő felmelegedésének mértéke és időtartama megfelelő lesz-e a szabályozó lengésmentes működése és a szabályozási eltérés szempontjából.
- 3./ Végül törekvésünk az, hogy a levezetett összefüggések - amellett, hogy a lejátszódó folyamatokat jól tükrözik, - viszonylag egyszerű, könnyen kezelhető méretezési képleteket eredményezzenek.

A./ A hőérzékelőt a hővezető kapilláriscső alsó zárt része képezi. Nincs elektromos fűtés, továbbá nem csökkentjük a kapilláriscső és a hideg környezet közötti hőcserét.

A kapilláriscső és az érzékelő elrendezését a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra

Az egyszerű kapilláriscső elrendezési vázlata.

L_f [m], az érzékelő beemerülési mélysége;

L_g [m], a kapilláriscső hossza a folyadékfelszín feletti gáztérben;

T_m [K°], a kapilláriscső felső meleg végének hőmérséklete $x = L_g$ helyen;

T_1 [K°], a kapilláriscső hőmérséklete a folyadék felszínénél, $x = 0$ helyen;

T_0 [K°], a kapilláriscső végének hőmérséklete;

T_s [K°], a kriogén folyadék párolgási nyomásához tartozó egyensúlyi /telítési/ hőmérséklet;

λ [kcal/m h °K], a csőanyag adott hőmérséklet határok közötti közepes hővezetési tényezője;

D [m], a kapilláriscső külső átmérője;

F [m²], a kapilláriscső hővezető keresztmetszete.

Megjegyezzük, hogy az x helykoordinátát a folyadék feletti és alatti szakaszon egyaránt a hővezetés irányával ellentétesen vettük fel.

Hőmérsékleteloszlás

A bevezetőben feltett kérdéseinkre a választ a cső x helykoordinátája mentén fellépő hőmérsékletváltozás vizsgálatával keressük. Tudjuk, hogy a hőmérsékletváltozást a cső hosszirányában történő hővezetés és a környezettel való hőcsere befolyásolják.

A 4. ábra jobboldalán látható dx hosszúságú csőelemre - a radiális hőmérsékletcsökkenés elhanyagolásával - a hőegyensúlyt az alábbi kifejezéssel kapjuk:

$$-\lambda F dx \frac{d^2 T}{dx^2} - \alpha D \pi dx / T - T_k / = 0 \quad , \quad /1/$$

ahol: T [K°] a csőelem hőmérséklete;

T_k [K°], a hidegebb környezet hőmérséklete;

α [kcal/m² h °K] a hidegebb külső közeg és a csőfal közötti hőátadási tényező;

λ [kcal/m h °K] a csőfal hővezetési tényezője;

D [m] és F [m²], már ismertek.

Az /1/ egyenletet $\lambda F dx$ -el osztva a következő egyszerűbb alakot nyerjük:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{\alpha D \pi}{\lambda F} (T - T_k) = 0 \quad /2/$$

A környezet hőmérsékletét állandónak feltételezve $(T_k = \text{const})$ kifejezzük a csőfal és a környezet közötti hőmérsékletkülönbséget:

$$T - T_k = \theta, \quad \text{ebből}$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{dT}{dx} \quad \text{és} \quad \frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{d^2T}{dx^2}$$

A /2/ egyenletből a második tag törtszoróját is állandónak tekinthetjük és a a -val jelöljük:

$$a = \frac{\alpha D \pi}{\lambda F} \quad [\text{m}^{-2}]$$

Fentieket a /2/ összefüggésbe helyettesítve a hőmérsékletváltozás differenciálegyenletét

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - a \theta = 0 \quad /3/$$

alakban kapjuk.

A másodrendű homogén differenciálegyenlet megoldási függvénye:

$$\theta = A e^{bx}$$

A megoldási függvény differenciálhányadosai:

$$\frac{d\theta}{dx} = b A e^{bx} \quad \text{és} \quad \frac{d^2\theta}{dx^2} = b^2 A e^{bx}, \quad \text{ezeket a /3/ egyenletbe}$$

helyettesítve a

$$b^2 A e^{bx} - a A e^{bx} = 0 \quad \text{algebrai alakot nyerjük.}$$

Meghatározzuk az ismeretlen b állandó értékét:

$$b^2 = a \quad \text{és} \quad b = \pm\sqrt{a}$$

A /3/ differenciálegyenlet általános megoldása

$$\theta = A_0 e^{+x\sqrt{a}} + A_1 e^{-x\sqrt{a}} \quad , \quad /4/$$

amelyben az A_0 és A_1 állandók értékét a peremföltételekből lehet meghatározni.

Az első peremföltétel a cső folyadékba merülő végére vonatkozik: $x = 0$ helyen a cső alsó végének hőmérséklete T_0 , tehát

$$x = 0, \quad T = T_0, \quad \theta = T_0 - T_s.$$

A fenti értékeket a /4/ egyenletbe helyettesítve

$$\theta = T_0 - T_s = A_0 + A_1$$

A második peremföltétel az elsőből következik: $x = 0$ helyen a hőmérsékletgradiens megfelel a hőérzékelő hengeres oldalfelületén a folyadék felé fellépő hőleadásnak. Itt elhanyagoljuk azt a hőmenyiséget, amely a $\theta = T_0 - T_s$ hőmérsékletkülönbség mellett az érzékelő véglapjáról abszorbeálódik a folyadékba. A második peremföltétel szerint

$$\lambda F \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \alpha F /T_0 - T_s/ ,$$

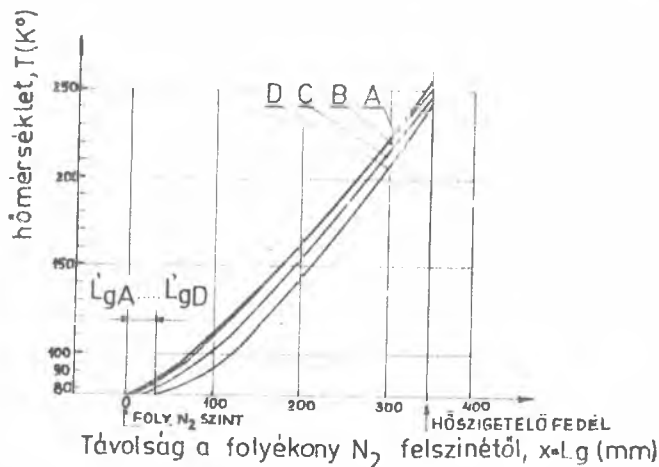
illetve λF -el osztva

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \frac{\alpha}{\lambda} /T_0 - T_s/.$$

Fentiekből A_0 és A_1 állandók értékét kiszámítva, behelyettesítve, és az egyszerűsítéseket elvégezve /az exponenciális függvények helyett hiperbolikus függvényeket vezetünk be/ az érzékelő folyadékba merülő részére vonatkozó hőmérsékleteloszlás egyenlete:

$$T - T_s = /T_0 - T_s/ \left[\operatorname{ch}x\sqrt{a_f} + \frac{\alpha_f}{\lambda\sqrt{a_f}} \operatorname{sh}x\sqrt{a_f} \right] / [^\circ\text{K}] \quad /5/$$

Az érzékelő folyadék feletti szakaszának hőmérsékleteloszlását vizsgálva a hőátadást és a gőz-tér mérésével megállapított függőleges hőmérsékletprofiljait /lásd az 5. ábrát és az I. táblázatot/ kell figyelembe vennünk [2] :



5. ábra

Függőleges hőmérsékletprofilok a folyadék feletti gőztérben.

$$T_k = T_s$$

I. táblázat

A függőleges hőmérsékletprofilok /5. ábra/ fontosabb számszerű értékei.

A hőm.profil jele	Párolgási sebesség / cm ³ folyadék/h/	L' _g /mm/	T _m ⁰ /K ⁰ /
A	60	4,0	255
B	70	7,5	251
C	100	17,5	247
D	150	34	241

c./ $X > L'_g$ értékeknél $T_k \neq T_s$, a T_k környezeti hőmérséklet T_s -től T_m -ig közel lineárisan növekszik. Lineáris növekedést feltételezve tetszőleges X pontban vett síkban a környezet hőmérséklete

$T_k = T_s + T$, és fentáll az alábbi arányosság:

$$\frac{T_m - T_s}{L_g} = \frac{T}{X} \quad \text{ebből} \quad T = \frac{X}{L_g} (T_m - T_s)$$

Helyettesítve a T -re kapott összefüggést

$$T_k = T_s + \frac{x}{L_g} (T_m - T_s) \quad , \quad /6/$$

kifejezéshez jutunk.

Az érzékelő és a környezet közötti hőmérsékletkülönbség

$$\theta = T - T_k \quad ; \quad \text{behelyettesítve a /6/ egyenletet a}$$

$$\theta = T - T_k = T - \left[T_s + \frac{x}{L_g} (T_m - T_s) \right] \quad \text{összefüggést kapjuk, amelyet}$$

szerint deriválunk:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{dT}{dx} - \frac{T_m - T_s}{L_g} \quad /6a/ \quad \text{és} \quad \frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{d^2T}{dx^2} \quad . \quad /6b/$$

A fenti eredmény azt jelenti, hogy a /3/ egyenlet az érzékelő folyadék feletti szakaszára $x > L'_g$ értékeknél is változatlanul érvényes:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - a_g \theta = 0 \quad , \quad /7/$$

ahol

$$a_g = \frac{\alpha_g D \pi}{\lambda F} \quad [m^{-2}] \quad .$$

A /7/ differenciálegyenlet általános megoldása:

$$\theta = A_0 e^{+x\sqrt{a_g}} + A_1 e^{-x\sqrt{a_g}} \quad /8/$$

A peremföltételek a következők:

$$x = 0 \quad \text{helyen} \quad T = T_1 \quad , \quad \theta = T_1 - T_s \quad ;$$

$$x = L_g \quad \text{helyen} \quad T = T_m \quad , \quad \theta = 0 \quad .$$

Az A_0 és A_1 állandóknak a peremföltételekből meghatározott értékeit behelyettesítve az érzékelő folyadék feletti szakaszára vonatkozó hőmérsékleteloszlásra az alábbi egyenletet kapjuk:

$$T - T_s = \frac{x}{L_g} / T_m - T_s / + / T_1 - T_s / \frac{\text{sh} / L_g - x / \sqrt{a_g}}{\text{sh} L_g \sqrt{a_g}} \text{ [}^\circ\text{K]} \quad /9/$$

A /9/ algebrai egyenletben ismeretlen T_1 , a két szakasz találkozási helyén kialakuló falhőmérséklet. T_1 értékét az egész kapilláriscsőre felírt hőegyensúlyból lehet meghatározni:

$$\dot{Q}_\delta = \dot{Q}_g + \dot{Q}_f \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right] \quad /10/$$

ahol:

$\dot{Q}_\delta \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$, a kapilláriscső felső meleg végén T_m hőmérsékleten belépő hőáram;

$\dot{Q}_g \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$, a kapilláriscső /érzékelő/ folyadék feletti szakaszán a hidegebb környezetnek leadott hőáram;

$\dot{Q}_f \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$, az érzékelőből a folyadékba távozó hőáram.

A hőátvitelt leíró egyenletek:

a./ $\dot{Q}_\delta = \lambda F \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L_g}$, amelyből /6a/ és /9/ helyettesítésével

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_m - T_s}{L_g} + \frac{d\theta}{dx} = \frac{T_m - T_s}{L_g} - \sqrt{a_g} / T_1 - T_s / \frac{\text{ch} / L_g - x / \sqrt{a_g}}{\text{sh} L_g \sqrt{a_g}}.$$

Ezt helyettesítve

$$\dot{Q}_\delta = \lambda F \left| \frac{T_m - T_s}{L_g} - \sqrt{a_g} \frac{T_1 - T_s}{\text{sh} L_g \sqrt{a_g}} \right| \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right] \quad /11/$$

b./

$$\dot{Q}_g = \alpha_g D \int_{x=0}^{x=L_g} /T - T_k/ dx = \alpha_g D \pi \frac{T_1 - T_s}{\text{sh} L_g \sqrt{a_g}} \int_{x=0}^{x=L_g} \text{sh} / L_g - x / \sqrt{a_g} dx ,$$

$$\dot{Q}_g = \lambda F \sqrt{a_g} / T_1 - T_s / \frac{\text{ch} L_g \sqrt{a_g}}{\text{sh} L_g \sqrt{a_g}} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right] \quad /12/$$

$$c./ \quad \dot{Q}_f = \alpha_f D\pi \int_{x=0}^{x=L_f} /T - T_s/ dx + \alpha_f F /T_o - T_s/ ,$$

tehát a folyadékba távozó hőáram a hőérzékelő palástfelülete és a folyadék, illetve a körgyűrű alakú homlokfelület /nagysága: $F [m^2]$ / és a folyadék közötti hőátadás összegeként adódik. A homlokfelület valódi nagysága: $F_o > F$. Az elhanyagolás a matematikai leírást egyszerűsíti anélkül, hogy a folyamat tényleges lefolyásának képét zavarná.

Az integrál megoldásához helyettesítjük $/T - T_s/$ -re kapott /5/ kifejezést:

$$\int_{x=0}^{x=L_f} /T - T_s/ dx = /T_o - T_s/ \int_{x=0}^{x=L_f} /ch x \sqrt{a_f} + \frac{\alpha_f}{\lambda \sqrt{a_f}} sh x \sqrt{a_f}/ dx .$$

Az integrálást elvégezve.

$$\dot{Q}_f = \alpha_f /T_o - T_s/ \left\{ \frac{D\pi}{\sqrt{\alpha_f}} \left[sh L_f \sqrt{a_f} + \frac{\alpha_f}{\lambda \sqrt{a_f}} /ch L_f \sqrt{a_f} - 1/ \right] + F \right\} \left[\frac{kcal}{h} \right] \quad /13/$$

algebrai egyenlethez jutunk.

A /11/, /12/ és /13/ egyenletet behelyettesítjük a /10/ egyenletbe, és kifejezzük a hőérzékelő folyadékba merülő végén fellépő hőmérsékletkülönbséget:

$$\theta_{x=0} = T_o - T_s =$$

$$= \frac{T_m - T_s}{L_g \left[chL_f \sqrt{a_f} \left(\frac{\alpha_f}{\lambda} + \sqrt{a_g} cthL_g \sqrt{a_g} \right) + shL_f \sqrt{a_f} \left(\frac{\alpha_f}{\lambda} \sqrt{\frac{\alpha_g}{\alpha_f}} cthL_g \sqrt{a_g} + \sqrt{a_f} \right) \right]} \quad [^{\circ}K]$$

Az /5/, /9/ és /14/ egyenletek segítségével meghatározhatjuk a hőérzékelő /kapilláriscső/ különböző szakaszain fellépő hőmérsékletkülönbségeket és a cső hőmérsékletét.

Az érzékelő időállandójának és a munkaközeg fázisváltásait kísérő hőjelenségek vizsgálatának módszereit B./-nél ismertetjük.

B./ A kisebb átmérőjű hővezető kapilláriscső alsó végére nagyobb átmérőjű szintérzékelő van felforrasztva.

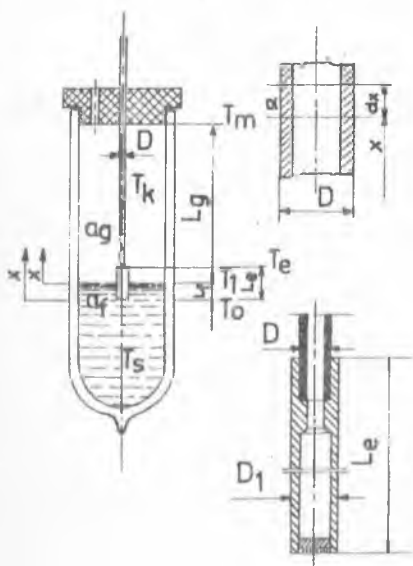
Nincs elektromos fűtés, továbbá nem csökkentjük a kapilláriscső és a hidegebb környezet közötti hőcserét.

Az elrendezést a 6. ábrán mutatjuk be.-A jelölések a 4. ábra, jelöléseivel azonosak, az érzékelő jellemző méreteit pedig az alábbiak szerint jelöljük:

L_e [m], az érzékelő hosszúsága;

D_1 [m], az érzékelő külső átmérője;

T_e [K°], az érzékelő és a kapilláriscső találkozási pontjának hőmérséklete.



6. ábra

A külön érzékelőt tartalmazó kapilláriscső elrendezési vázlat.

Hőmérsékleteloszlás

Az érzékelő és a kapilláriscső különböző szakaszainak hőmérsékleteloszlását az A./-nál levezetett /5/, /9/ és /14/ egyenletekkel kapjuk. Mivel az érzékelőnél az axiális hőmérsékleteloszlást alapvetően a kapilláriscsővön keresztül bevezetett hőáram nagysága határozza meg, az érzékelőre vonatkozó összefüggésekben szereplő "a" állandó kiszámolásánál is D [m] és F [m²] értékeket lehet helyettesítenünk.

T_e [K°] értékét az $x = L_e$ helykoordinátára vonatkozó $\theta_{x=L_e}$ [K°]

hőmérsékletkülönbségből számolhatjuk, amelyet vagy az /5/ vagy a /9/ egyenlettel kapunk:

ha a találkozási hely a szabályozott felszínű folyadékba merül a

$$\theta_{x=L_e} = T_e - T_s \quad [K^{\circ}] \quad /5/$$

egyenletet, ha pedig a találkozási hely a folyadék feletti gőztérben van a

$$\theta_{x=L_e} = T_e - T_s \quad [K^{\circ}] \quad /9/$$

egyenletet kell alkalmaznunk.

A szintérzékelőnek külön szerkezeti elemként való beépítése akkor indokolt, ha az A./-szerinti elrendezéssel összehasonlítva nő a szabályozás pontossága, és csökken a reagálási idő. Ennek eldöntésére megvizsgáljuk az érzékelő és a hidegebb környezet közötti hőátadási folyamatot, és meghatározzuk az érzékelő időállandóját.

A szintérzékelő lehülése, az időállandó meghatározása

a./ Az időállandó közelítő értékének meghatározásánál többek között elhanyagoljuk a kondenzációs hő és a kapillariscsövön keresztül a találkozási helynél bevezetett hő elvonását, az érzékelő anyagának hővezetési ellenállását pedig nulla értékűnek feltételezzük.

A melegebb szintérzékelő és a hidegebb környezet közötti hőátadás időbeli lefolyását az

$$F_e \alpha_f \theta dt = -G_e c d\theta \quad /15/$$

egyenlet írja le, amelyben:

$F_e [m^2]$, az érzékelő külső hőátadó felülete;

$\alpha_f [kcal/m^2 \cdot h \cdot K^{\circ}]$, az érzékelő és a szabályozott felszínű folyadék közötti hőátadási tényező;

$\theta [K^{\circ}]$, az érzékelő és a környezet közötti hőmérsékletkülönbség;

$t [s]$, az idő;

$G_e [kg]$, az érzékelő tömege;

c [kcal/kg K⁰], az érzékelő anyagának közepes fajhője θ [K⁰] hőmérséklet-tartományban.

Abban az esetben, amikor az érzékelő csak részben merül a folyadékba, a /15/ egyenletben az L'_e merülési hosszának megfelelő F'_e hőátadó felülettel kell számolnunk. A hővezetési ellenállás nulla értéke miatt viszont a teljes érzékelő lehűtését kell figyelembe vennünk.

A változókat szétválasztva a /15/ egyenlet mindkét oldalát integráljuk

$$\int_{\theta_0}^{\theta} \frac{d\theta}{\theta} = - \frac{F_e \alpha_f}{G_e c} \int_0^t dt ,$$

$$\ln \theta - \ln \theta_0 = \ln \frac{\theta}{\theta_0} = - \frac{F_e \alpha_f}{G_e c} t \quad \text{amelyet}$$

$$\frac{\theta}{\theta_0} = e^{- \frac{F_e \alpha_f}{G_e c} t} \quad \text{alakura hozunk.} \quad /16/$$

Az exponenciális függvényt a 7. ábra szerinti exponenciális görbe ábrázolja, amelyen grafikus szerkesztéssel meghatároztuk az időállandót.

Bevezetjük az időállandóra a

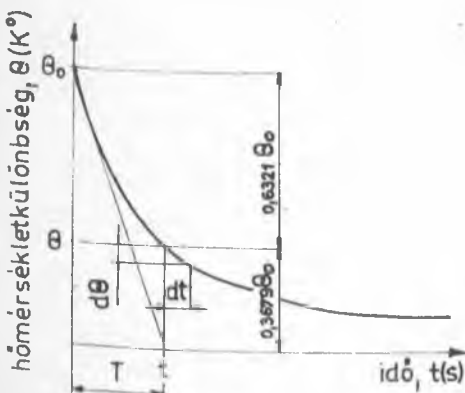
$$T = \frac{G_e c}{F_e \alpha_f} \text{ [s]} \quad /17/$$

jelölést, és kifejezzük a t időpillanatban fentálló θ hőmérsékletkülönbséget:

$$\theta = \theta_0 e^{- \frac{t}{T}} \text{ [K}^0\text{]} \quad /18/$$

$t = T$ időpontban

$$\theta = \theta_0 e^{-1} = 0,3679 \theta_0$$



7. ábra

Az érzékelő átmeneti függvény-grafikonja.

Az érzékelő időállandója tehát azt az időt jelenti, amely alatt az érzékelő és a környezet közötti hőmérsékletkülönbség a θ_0 kezdeti hőmérsékletkülönbség kb. 37%-ára csökkent.

b./ Az időállandó pontosabb értékének meghatározásánál a munkaközeg kondenzációs hőjének elvonását is figyelembe vesszük.

A munkaközeg kondenzációja abban az esetben jön létre, amikor az érzékelő hőmérséklete alacsonyabb a telített gőz hőmérsékleténél. A szintérezékelő hengeres belső felületén a munkaközeg vékony hártya alakban kondenzálódik, és lefolyik az érzékelő alsó részébe. A belső felület nedvesítése a kondenzáció sebességétől függ: kisebb kondenzációs sebességnél jó, nagyobbánál pedig rosszabb a nedvesítés.

A függőleges csőfelületen nem nagy sebességgel laminárisan lefolyó kondenzátum és a csőfal közötti α_c kondenzációs hőátadási tényezőt a Nusselt által javasolt összefüggésekkel lehet kiszámolni [3].

Az érzékelő hőmérlege:

$$Q_f - Q_e - Q_c = 0 \quad /19/$$

ahol: Q_f /kcal/, az érzékelő külső felületén a szabályozott felszínű folyadéknak átadott hő;

Q_e /kcal/, az érzékelőből elvont hő;

Q_c /kcal/, a munkaközeg elvont kondenzációs hője.

A /19/ kifejezésben nem vettük figyelembe a munkaközegnek a telítési hőmérsékletig való lehütéséhez, a lehütés hőmérséklettartományában változó értékű folyadék és gőzhányadnak a kondenzáció vég hőmérsékletéig történő lehütéséhez, valamint az érzékelő felső végén T_c hőmérsékleten a kapilláriscsőből bevezetett hő elszállításához szükséges hőelvonást. Az elhanyagolások a fizikai folyamat leírásának helyességét nem befolyásolják: az oxigén munkaközeg 70 ... 105 K⁰ hőmérséklet közötti közepes párolgáshője $\bar{r} = 51$ kcal/kg, míg a kondenzált oxigén fajhője $C_p = 0,4$ kcal/kg K⁰, az oxigén telített gőzének fajhője pedig $C_p = 2,18 \cdot 10^{-4}$ kcal/kg °K ugyanabban a hőmérséklettartományban. A T_e hőmérsékleten bevezetett hő értéke már közepes párolgási veszteségeknél is igen kicsiny, ugyanis a folyadékfelszín feletti l'_y távolságon belül a környezet hőmérséklete azonos a szabályozott felszínű folyadék hőmérsékletével: $T_k = T_s$.

Fentiek figyelembevételével a szintérzékelő lehülését és a munkaközeg kondenzációjának menetét az

$$F_e \alpha_f \Theta dt = - (G_e c + G'_c \bar{r}) d\Theta \quad /20/$$

egyenlet írja le, amelyben

G'_c [kg/K°] , az egységnyi hőmérsékletcsökkenés hatására kondenzált munkaközeg mennyisége;

\bar{r} [kcal/kg] , a munkaközeg közepes párolgáshője a folyamat hőmérséklettartományban

képezik az új jelöléseket. A /20/ összefüggés ugyan nem ad felvilágosítást a kondenzációs hő szabályozott felszínű folyadékba való átvitelének hőtanijellegzetességeire vonatkozóan, de segítségével az időállandó pontosabb értékének meghatározására van lehetőségünk.

A /20/ egyenlet átrendezésével kifejezzük a lehülés sebességét

$$-\frac{1}{\Theta} \frac{d\Theta}{dt} = \frac{F_e \alpha_f}{G_e c + G'_c \bar{r}} \quad /21/$$

A /21/ összefüggés jól szemlélteti az egyes tényezőknek a hűtési sebességre gyakorolt hatását.

Az időállandó pontosabb értékének meghatározásához a /20/ egyenlet változónak szétválasztása és az integrálás elvégzése után a

$$\frac{\Theta}{\Theta_0} = e^{-\frac{F_e \alpha_f}{G_e c + G'_c \bar{r}} t} \quad /22/$$

kifejezést kapjuk, amelyből az időállandó

$$T = \frac{G_e c + G'_c \bar{r}}{F_e \alpha_f} \text{ [s]} \quad /23/$$

Látható, hogy az időállandó /23/ szerinti pontosabb értéke nagyobb a /17/ összefüggéssel nyerhető közelítő értékénél.

A t időpillanatban fentálló hőmérsékletkülönbséget a /18/ egyenlettel határozzuk meg, amelybe az időállandó /23/-al kiszámolt értékét helyettesítjük.

A kondenzációs hő elvonása

a./ A kondenzációs hő elvonásának hőtani jellegzetességeit vizsgálva a

$$\dot{Q}_c = F_e k \theta \quad [\text{kcal/h}] \quad /24/$$

összefüggést írjuk fel, amelyben

\dot{Q}_c [kcal/h], a kondenzációs hő elszállító hőáram;
 k [kcal/m²hK^o], a hőátbocsájtási tényező.

A kondenzációs hőáramot a

$$\dot{Q}_c = \frac{Q}{t} \quad [\text{kcal/h}] \quad /25/$$

egyenlettel határozzuk meg, t [h] a hőelvonás időtartama. A kondenzációs hőre a /20/ kifejezésben a

$Q_c = G'_c \bar{r} d\theta$ [kcal] összefüggést adtuk, amelyből

G'_c [kg/K^o] fizikai tartalmát, jelentését és meghatározásának lehetőségeit kell közelebbről megismernünk.

A v_M [cm³] belső műszertérfogatot kitöltő munkaközeg nyomását kondenzáció /párolgás/ közben az érzékelő hőmérséklete szabja meg. A folyadékkal érintkező gőz telített állapotban van, a folyadék-gőz rendszer telítési nyomása tehát a telítési hőmérséklet függvénye: $p_s = f/T_s$.

A telítési hőmérséklethez tartozó telítési nyomást ismertve az adott T_s hőmérsékleten jelenlévő gőz- és folyadékfázis térfogatát könnyen meghatározhatjuk. A gőzfázis térfogata:

$$v'' = p'_{sIII2} v_M \frac{p_B}{p_O} \frac{T_O}{T_2} \quad [\text{Ncm}^3] \quad /26/$$

ahol:

p'_{sII2} [ata] a telítési nyomás értéke a környezettel való hőegyensúly beállítására után,

v_M [cm³] a műszer munkaközeggel töltött térfogata,

p_B [tor] a barométerállítás,

$p_0 = 760$ tor,

T_2 [K⁰] a környezet hőmérséklete,

$T_0 = 273,15$ K⁰.

A folyadékfázist alkotó munkaközeg térfogata

$$V' = V - V'' \text{ [Ncm}^3\text{] ,} \quad /27/$$

ahol V [Ncm³] a betöltött munkaközeg összes térfogata. A T_s hőmérsékleten jelenlévő kondenzátum térfogata

$$V_f = \epsilon V' \text{ [mm}^3\text{] .} \quad /28/$$

A /28/ összefüggésben

$\epsilon = 1,252$ [mm³/Ncm³], az 1. Ncm³ gázból keletkező folyadék térfogata mm³-ben.

Megjegyezzük, hogy a kísérleti vizsgálat folyamán csak p'_{sII2} értékét tudjuk mérni. A munkaközeg kondenzálódásakor ugyanis a gázállapotban maradt munkaközeg hőmérséklete gyakorlatilag változatlan marad, elpárolgáskor pedig már a párolgás időtartama alatt beáll a hőegyensúly a T_k [K⁰] hőmérsékletű környezettel.

A munkaközeg folyadék-gőz fázisarányának meghatározásánál fontos a T_s telítési hőmérséklet értékének ismerete. A szintérzékelő folyadék-bamerülő és folyadék feletti részeinek hőmérséklete ugyanis az /5/ és /9/ egyenletekkel jellemzett mértékben növekszik az x helykoordináta mentén, és ismernünk kell a falhőmérsékletnek azt az értékét, amely azonos a kondenzált munkaközeg telítési hőmérsékletével: $T_x = T_s$. Azt a falhőmérséklet értéket, amelyre fentáll a $T_x = T_s$ egyenlőség, a következőkben vonatkozási hőmérsékletnek nevezzük, és

$$T_v \text{ [K}^0\text{]} \quad \text{-al jelöljük. Tehát: } T_x = T_s = T_v .$$

A kondenzátum súlyát a $\theta_{ct} = T_{sIII} - T_{sII2}$ [K°] működési hőmérsékletek között vett közepes folyadékfajsúly $\bar{\gamma}$ kg/dm³/figyelembevételével határozzuk meg:

$$G_c = V_{ft} \bar{\gamma} \quad [kg] \quad /29/$$

és ebből

$$G'_c = \frac{G_c}{\theta_{ct}} \quad [kg/K^\circ] \quad /30/$$

összefüggéssel nyerjük az 1 K° hőmérsékletcsökkenéssel elérhető fajlagos kondenzátum mennyiségét.

A /30/ egyenlet a hőmérsékletváltozás és a kondenzálódott munkaközeg mennyisége között lineáris kapcsolatot feltételez. Fázisváltásnál ez a feltétel nem teljesül, azonban a /30/ formulát interpolációs képletként használhatjuk. Az interpolációs összefüggéssel számolt jellemzők, mint azt a későbbiekben látjuk majd - a mért értékekkel a mérési hibán belül jó egyezést mutatnak^x.

A /24/ egyenletben szereplő k hőátbocsájtási tényezőre a

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} \frac{F_e}{F_c} + \frac{1}{\alpha_f} \frac{F_e}{F_f} + \frac{\delta}{\lambda}} \quad [kcal/m^2 h K^\circ] \quad , \quad /32/$$

összefüggés vonatkozik, amelyben az alábbi jelölések még ismeretlenek:

F_c [m²] az érzékelő belső hőátadó felülete, amelyen létrejön és lefolyik a filmszerű kondenzátum;

$F_f = F_e$ [m²] a külső, szabályozott felszínű folyadékba merülő hőátadó felület;

δ [m] a hőérzékelő falvastagsága;

λ [kcal/m h K°] a hőérzékelő anyagának közepes hővezetési tényezője.

^x Az interpolációs képlettel meghatározott G'_c [kg/K°] fajlagos kondenzátum súly ugyanis az érzékelő adott θ_{ct} [K°] működési hőmérséklet-tartományában kondenzálódott teljes munkaközeg súlyt adja meg a $G_c = G'_c \theta_{ct}$ [kg] összefüggés alapján. Az időállandó meghatározásánál pedig az adott θ_{ct} [K°] tartományban elvont $Q_c = G_c r$ [kcal] összes kondenzációs hő mérvadó.

b./ A kondenzációs hő elvonásának folyamatát szabályozástechnikai szempontból T időállandóval jellemezhetjük, amelyet az

$$F_e k_0 dt = G'_c \bar{r} d\theta \quad /33/$$

összefüggésből az ismert módon lehet meghatározni:

$$T = \frac{G'_c \bar{r}}{F_e k} \quad [s] \quad /34/$$

A $p_s = f / T_s /$, $v_s = f / T_s /$ és $G = f / v_s /$ összefüggések számolása a gőznyomásgörbe differenciálegyenletéből.

A munkaközeg folyadék-gőz fázisarányának a megismert indirekt uton történő meghatározásánál alkalmazott eljárás alapját a $p_s = f / T_s /$ függvénykapcsolat képezi, amelyet a gőznyomásgörbe ábrázol. Kisebb hőmérsékletváltozásnál a szokásos koordináta-léptékben ábrázolt diagramon a leolvasási pontosság nem felel meg a gyakorlati követelményeknek. A telítési nyomás pontosabb értékének ismerete ugyanis nemcsak a fázisarányok kiszámolásához, hanem a jelátvivő tagot, illetve a beavatkozó szervet működtető erő meghatározásához is szükséges. Ezért ismertetjük a telítési nyomás számításának egyik egyszerű lehetőségét.

Ezenkívül analitikus összefüggést adunk a folyadék mennyiségének közvetlen módon való meghatározására a $v_s = f / T_s /$ függvénykapcsolat felhasználásával.

A szintérzékelőben lejátszódó fázisváltozásoknál az alábbiakat kell figyelembe vennünk:

- a./ A fázisváltozások szűk hőmérsékletközben folynak le, amelyen belül a párolgáshőt állandónak feltételezzük: $r = \text{konstans}$.
- b./ A folyadék fajtérfogata $/v'/$ elhanyagolható a telített gőz fajtérfogata $/v''/$ mellett: $v'' \gg v'$.
- c./ A munkaközeg kicsiny nyomása miatt a telített gőzt ideális gázként kezelhetjük:

$$v'' = \frac{RT}{p} = v ;$$

$$p = \frac{RT}{v} , \quad \text{és}$$

$$dp = - dv \frac{RT}{v^2} ;$$

R [kpm/kg K⁰] a munkaközeg gázállandója.

A gőznyomásgörbe differenciálegyenlete a Clausius-Clapeyron egyenlete

$$r \frac{dT}{T} = A / v'' - v' / dp \quad /35/$$

amelyben: r [kcal/kg] a párolgáshő,

v'' [m³/kg] a gőz fajtérfogata,

v' [m³/kg] a folyadék fajtérfogata,

A = $\frac{1}{427}$ [kcal/mkg] a mechanikai hőegyenérték,

T [K⁰] a telítési hőmérséklet.

A /35/ egyenletet a telítési nyomás hőmérsékletfüggésének meghatározása érdekében helyettesítéssel

$$r = \frac{ART^2}{p} \frac{dp}{dT} = \text{állandó}$$

alakúra hozzuk, amelyből

$$d \ln p = \frac{r dT}{ART^2}$$

Bevezetjük a

$$b = \frac{r}{AR} \quad \text{jelölést és elvégezzük az integrálást:}$$

$$\ln p = - \frac{b}{T} + C_1 \quad /36/$$

ahol C₁ integrálási állandó, értékét T és p egy méréssel kapott értékpárjának helyettesítésével lehet megállapítani. Ha $\theta_{ct} > 5 \text{ K}^0$, C₁ integrálási állandó mellett b értékét is célszerű mért adatok felhasználásával kiszámolni. Az egyik értékpár ebben az esetben a normál forráspontban mért telítési nyomás és hőmérséklet lehet, amelyek helyettesítésével az integrálási állandóra

$$C_1 = \ln p_s + \frac{b}{T_s}$$

összefüggést kapjuk. A másik értékpárt például a maximális merülési mélységnél mért telítési gőznyomás és a hozzá tartozó telítési hőmérséklet alkothatják.

Az adott telítési hőmérsékletnél keletkezett folyadék mennyiségét

$$G_c = G_m - \frac{v_M}{v} \text{ [kg]} \quad /37/$$

egyenlettel közvetlenül meghatározhatjuk. Az összefüggésben

- G_c [kg] a kondenzált munkaközeg tömege,
- G_m [kg] az összes munkaközeg tömege,
- v_M [m³] a műszer munkaközeggel kitöltött térfogata,
- $v = v''$ [m³/kg] a telített gőz fajtérfogata.

A telített gőz fajtérfogatának kiszámolására a /35/ egyenletet megfelelő helyettesítésekkel

$$r = - AR T^2 \frac{d \ln v}{dT} = \text{konstans}$$

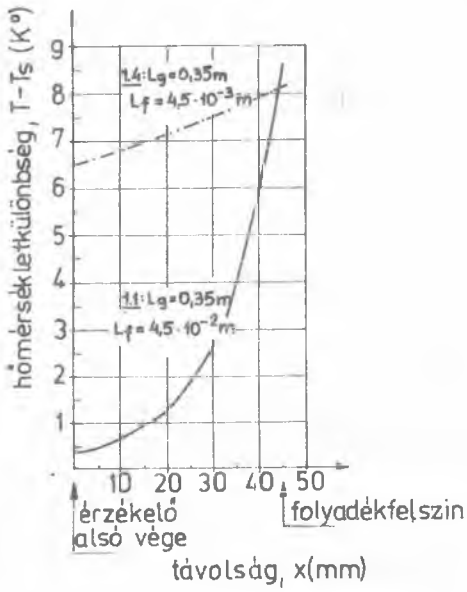
alakban írjuk fel, amelyből integrálás és $b = \frac{r}{AR}$ jelölés bevezetése után

$$\ln v = \frac{b}{T} + C_2 \quad /38/$$

összefüggést nyerjük. A b és A állandók meghatározása a már megismert módon történik az azonos hőmérsékletre vonatkozó telítési nyomás /36/ szerinti értékének felhasználásával. A $p_s = f(T_s)$ és a $v_s = f(T_s)$ függvénykapcsolatot leíró további egyenletek [4, 5, 6] -ban találhatóak.

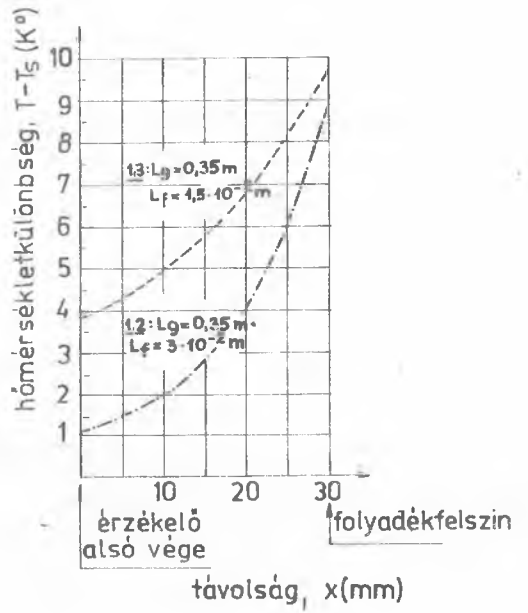
A szintérzékelő felmelegedése

Az érzékelő felmelegedésénél a hőmérsékletnövekedés sebessége kicsiny és közepes párolgási-veszteségű folyadékfűrdők esetében igen kicsiny értékű. A szabályozó nyugalmi állapotában a párolgási sebességtől függően változik az érzékelő folyadékba merülő hossza, s ezzel együtt a folyadék alatti és feletti részek hőmérsékleteloszlása /lásd a 8., 9. és 10. ábrákat/. A munkaközeg állapotát a $T_v = T_s$ hőmérséklet szabja meg. A folyadékutántöltésnek $T_s = T_{sIII}$ esetén, de legkésőbb a $T_s = T_{sIII}$ állapot elérésénél meg kell kezdődni. E követelménynek megfelelő szabályozó részben folyadékba merülő szintérzékelőjében a működési periódus kezdetén a munkaközeg egy része még folyadékfázisban van. Az utántöltéssel kezdődő - az előbbi fejezetben megismert - lehülési folyamat sebessége igen nagy lesz.



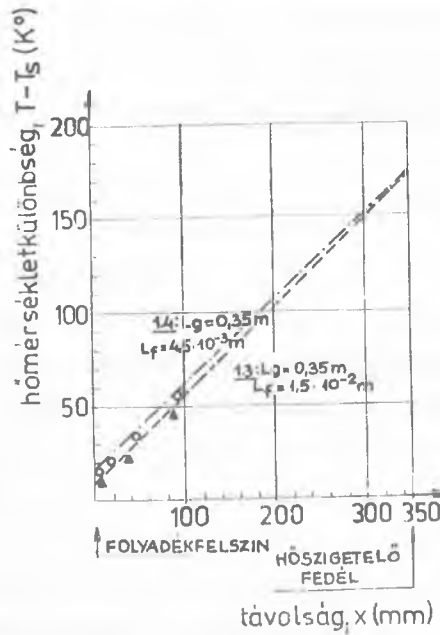
8. ábra

A kapilláriscső folyadékbaerülő részének hőmérsékleteloszlása /1.1 és 1.4/.



9. ábra

A kapilláriscső folyadékbaerülő részének hőmérsékleteloszlása /1.2. és 1.3/.



10. ábra

A kapilláriscső folyadék feletti szakaszának hőmérsékleteloszlása /1.3 és 1.4/.

Fenti okok miatt a felmelegedés menetének vizsgálatát arra az esetre vonatkozóan célszerű elvégezni, amikor a munkaközeg nagyobb részét még kondenzált fázisban tartalmazó érzékelő hőátadó felületének túlnyomó része rövid idő alatt a szabályozott felszínű folyadék feletti gőztérbe kerül / $x = 0 \dots 5 \text{ mm}$ /. Ez a gyors folyadékszint-csökkenés jellemzi pl. a nagyobb párolgási sebességű hidegfizikai vagy vegyipari-hidegtechnológiai berendezésekben működő szintszabályozókat.

A gőztérben elhelyezkedő érzékelő hőmérlege / $L_f = 0$ esetre/

$$Q_v - Q_c - Q_e - Q_g = 0, \quad /39/$$

ahol: Q_v [kcal], a kapilláriscsőből T_e hőmérsékleten vezetéssel átadott hő;

Q_c [kcal], a kondenzált munkaközeg részleges /v. teljes/ elpárologtatásának hőszükséglete;

Q_e [kcal], az érzékelő felmelegítéséhez szükséges hőmennyiség;

Q_g [kcal] az érzékelő F_e [m^2] felületén a hidegebb környezetnek átadott hőmennyiség.

Az érzékelő felmelegedésének differenciálegyenlete / $L_f = 0$ esetre/

$$\frac{d\dot{Q}_v - \dot{Q}_g}{dt} = \frac{G_e c + G'_c \bar{r}}{d\theta}, \quad /40/$$

amelyből a felmelegedés sebessége:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\dot{Q}_v - \dot{Q}_g}{G_e c + G'_c \bar{r}}. \quad /41/$$

A /41/ egyenlet nevezőjében lévő kifejezések már ismertek, a számlálóban lévő hőáramokat pedig az alábbi analitikus összefüggésekkel számolhatjuk:

$$a./ \quad \dot{Q}_v = \lambda F \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L_e} \quad [\text{kcal/h}]$$

/6a/-ből

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_m - T_s}{L_g} + \frac{d\theta}{dx}, \quad \text{amelybe behelyettesítjük}$$

$\frac{d\theta}{dx}$ -nek /9/-ből kifejezett értékét:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_m - T_s}{L_g} - \sqrt{a_g} / T_1 - T_s / \frac{\text{ch } L_g - x / \sqrt{a_g}}{\text{sh } L_g \sqrt{a_g}}$$

Tehát:

$$\dot{Q}_{v_{x=L_e}} = \lambda F \left[\frac{T_m - T_s}{L_g} - \sqrt{a_g} / T_1 - T_s / \frac{\text{ch } /L_g - L_e / \sqrt{a_g}}{\text{sh } L_g \sqrt{a_g}} \right] \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right] . \quad /42/$$

$$\text{b.}, \quad \dot{Q}_g = \alpha_g D_1 \pi \int_{x=0}^{x=L_e} /T - T_k / dx \quad [\text{kcal/h}] .$$

/6/-ből és /9/-ből kifejezzük $/T - T_k /$ értékét:

$$T - T_k = T_1 - T_s \frac{\text{sh } /L_g - x / \sqrt{a_g}}{\text{sh } L_g \sqrt{a_g}}, \quad \text{majd helyettesítve}$$

$$\dot{Q}_g = \alpha_g D_1 \pi \frac{T_1 - T_s}{\text{sh } L_g \sqrt{a_g}} \int_{x=0}^{x=L_e} \text{sh } /L_g - x / \sqrt{a_g} dx .$$

Az integrálást elvégezve

$$\dot{Q}_g = \alpha_g D_1 \pi /T_1 - T_s / \frac{\text{ch } /L_g - L_e / \sqrt{a_g}}{\text{sh } L_g \sqrt{a_g}} \left[\frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right] . \quad /43/$$

A /41/ egyenlet jól szemlélteti a különböző tényezőknek az érzékelő felmelegedési sebességére gyakorolt hatását. Gyors hőmérsékletemelkedés érdekében a jó hővezető anyagokból készített kapilláriscső hővezető keresztmetszetét megfelelő nagyságúra kell megválasztani, és gondoskodni kell az érzékelő optimális méreteiről. A munkaközeg befolyását az alábbiakban részletesebben megtárgyaljuk.

A szintérzékelő felmelegedését jellemző időállandót a bemutatott módszer szerint lehet meghatározni.

Az átalakulási hő befolyása

Mint azt az előbbiekben láttuk, a szintérzékelő lehülési és felmelegedési sebességét a latenshő mennyisége jelentős mértékben befolyásolta. A latenshő mennyisége a szabályozóba töltött munkaközeg párolgáshőjétől, térfogatától és a keletkezett folyadékfolyadéktól függ:

$$Q_c = x v_M p r 10^{-6} \text{ [kcal] , } \quad /44/$$

ahol: x , a kondenzáció végét jelentő T_{sII2} hőmérsékleten fellépő folyadékhiányad;

v_M [cm^3], a szabályozó munkaközeggel kitöltött belső térfogata;

p [ata] a munkaközeg töltési nyomása.

r [cal/Ndm^3] a munkaközeg párolgáshője.

A munkaközeg-gáz $v = v_M p$ térfogatát Ncm^3 egységre kell átszámolnunk.

Tekintettel arra, hogy a szabályozó reagálási idejét alapvetően az érzékelő időállandója szabja meg, az érzékelő gyors hőmérsékletváltozása érdekében a szabályozó v_M térfogatát és a töltési nyomást a lehetséges legkisebb értékre tervezzük. A munkaközeg megválasztása szempontjából a párolgáshő és az adott telítési hőmérsékleten keletkező folyadékhiányad nagysága mérvadó.

A mért és számolt eredmények összehasonlítása, értékelés

A szintérzékelő hőtani viselkedését leíró összefüggések levezetésénél tett feltételezéseink helyességének ellenőrzése, a levezetett egyenletek peremfeltételeiként szereplő különböző hőmérsékletek tényleges értékének megállapítása, és az egyenletek segítségével kiszámolt hőmérsékletértékek mért értékekkel való összehasonlítása céljából elvégeztük az 1. és 2. ábrán bemutatott műszerek kísérleti vizsgálatát. A mérőberendezés felépítését és a mérés leírását [2] tartalmazza.

A mérési eredményeket az alábbiak szerint csoportosítjuk:

- 1./ A mérőberendezésre vonatkozóan különböző párolgási veszteségeknél meghatároztuk a folyékony nitrogén feletti gőztér függőleges és vízszintes hőmérsékleteloszlását. A függőleges hőmérsékletprofilok jellemzőit az 5. ábrán és az 1. táblázatban mutattuk be. A vízszintes hőmérsékletprofil minden x távolságban majdnem teljesen egyenletes. A teljes hőmérsékletkülönbség mért értéke egy-egy keresztmetszetben $0,05 \dots 1,5 \text{ K}^0$. A vízszintes hőmérsékletprofilok azt bizonyítják, hogy az adott párolgási sebességeknél a vízszintes anyagáramok az emelkedő gőzoszlop minden keresztmetszetében egyensúlyi állapotokat hoznak létre.

2./ A 2. ábrán látható - A-szerinti érzékelővel rendelkező - jelátvivő tagra vonatkozóan "B" jelű hőmérsékletprofilnál és különböző merülési mélységnél mértük

- a./ a kapilláriscső folyadék feletti szakaszán fellépő hőmérséklet-eloszlást /10. ábra/,
- b./ a munkaközeg-gáz p_{sIII2} [ata] abszolút nyomását /2. táblázat/,
- c./ a reagálási időt a szintérzékelő lehülésénél és felmelegedésénél /3. táblázat/.

A reagálási idő mérésénél a kapilláriscső alsó végét a folyékony nitrogén felszíne felett $x=1$ mm távolságban tartottuk, és a felület nedvesítése nélkül megvártuk a hőegyensúly beállítását. Utána az érzékelőt hirtelen az előírt mélységig a folyadékba merítettük, és mértük a p_{sIII2} nyomás elérésének időtartamát. Tapasztalataink szerint a reagálási idő nagyobb részét az érzékelő és a munkaközeg előhűtése tette ki. A kondenzálódás minden merülési mélységnél néhány másodperc alatt történt meg.

3./ Az 1. ábrán bemutatott - B-szerinti érzékelővel rendelkező - szabályozóra vonatkozóan "B" jelű hőmérsékletprofilnál különböző merülési mélységeknél mértük a reagálási időket /4. táblázat/.

A szabályozó jellemzői:

$$\begin{aligned}d &= 3 \times 1 \text{ mm, a réz kapilláriscső mérete;} \\G_e &= 2,67 \text{ g, } L_e = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m, } F_e = 6,35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, F_c = 5,65 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \\ \delta &= 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m, } \lambda = 400 \text{ kcal/mh K}^{\circ} \text{ az érzékelő adatai;} \\L_g &= 0,25 \text{ m.}\end{aligned}$$

Mérésnél az érzékelőt a folyadékszint feletti $x=5$ mm magasságból nagy sebességgel adott L_f értékig a folyékony nitrogénbe merítettük, és megmértük a membráncsővel működtetett túszelep nyitásáig eltelt időt. Utána a szintérzékelőt ismét $x=5$ mm magasságig emeltük, közben mértük a túszelep zárásáig eltelt időt. $L_f = 15$ mm-nél a szabályozó már nem működik, mert a munkaközeg abszolút nyomása azonos vagy nagyobb az atmoszférikus nyomásnál. Ez a tapasztalat egyébként a 2. táblázat 1.3 rovatában található mérési eredményeknek is megfelel.

A 2. ábra szerinti - A-típusú érzékelővel rendelkező - átvivő tagra vonatkozóan elvégezzük a működési jellemzők számolását.

2. táblázat

A szabályozó működési jellemzői

Jel	Merülési mélység L_f /m/	Abszolút nyomás p_{sII2} /ata/	Munkaközeg térfogat					Folyadék		Megjegyzés
			gőzfázis /26/ $V''/Ncm^3/$	kond.gáz /27/ $V^*/Ncm^3/$	folyadék /28/ $V_f/mm^3/$	folyadék /37/38/ $V_f/mm^3/$	folyadék $\Delta V_f = V_{f5} - V_{f6}$ /mm ³ /	hányad x	oszlop- magasság h/mm/	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
1.1	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,473	5,34	32,46	40,70	40,80	-0,10	0,86	13	$T_v=83,5 K^0$, $X_v= 41$ mm
1.2.	$3 \cdot 10^{-2}$	0,579	6,53	31,27	39,2	39,35	-0,15	0,827	12,5	$T_v=85,5 K^0$, $X_v= 28$ mm
1.3	$1,5 \cdot 10^{-2}$	1,00	11,30	26,50	33,20	31,40	+1,80	0,702	10,6	$T_v=90,19 K^0$, $X_v = 23$ mm
1.4	$4,5 \cdot 10^{-3}$	1,30	14,70	23,10	28,95	30,50	+1,55	0,612	9,7	$T_v=92,5 K^0$, $X_v = 3,4$ mm
1.5	0	1,55	17,50	20,30	25,45	27,80	-2,35	0,537	8,8	$X = L_g = 0$. A hullámszó folyadék a kapilláriscső végét kb. 1,5 mm hosszan nedvesítette. $T_v = 94 K^0$.
1.6	0	3,20	36,1	/1,7/	/2,13/	-	-	/0,045/	/0,68/	$X = L_g = 1 \cdot 10^{-3}$ m. Nincs nedvesítés. A fázisváltás határa. $T_v = 102 K^0$.

3. táblázat

A jelátvivő-tag /2. ábra, A-szerinti érzékelő/ időállandója és reagálási ideje

Jel	Merülési mélység L_f [m]	A szintérezékelő lehűlésénél							Reagálási idő mért értéke felmelegé- désnél t [s]
		időállandók: t [s]			reagálási idők: t [s]				
		számolt			számolt			mért	
		/17/	/23/	/34/	/17/-ből	/23/-ből	/34/-ből		
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
1.1	$4,5 \cdot 10^{-2}$	0,783	1,57	11,47	2,55	5,12	37,3	39,2	60
1.2	$3 \cdot 10^{-2}$	1,175	2,365	16,8	3,16	6,57	46,7	49	52
1.3	$1,5 \cdot 10^{-2}$	2,37	4,63	31,9	4,16	8,12	56	58	41
1.4	$4,5 \cdot 10^{-3}$	7,83	20,20	17	4,57	11,8	10	27	32

4. táblázat

A szintszabályozó /1. ábra, B-szerinti érzékelő/ reagálási ideje

Merülési mélység L_f [mm]	Reagálási idő lehűléskor t [s]	Reagálási idő felmelegedéskor t [s]
45	3	12
22,5	4	10
15	∞	-

Hőmérsékleteloszlás

Adatok: $L_g = 0,35$ m, $D = 3 \cdot 10^{-3}$ m, $L_f = 1,5 \dots 15 D = 4,5 \dots 45 \cdot 10^{-3}$ m, $F = 3,93 \cdot 10^{-6}$ m² ;

$T_m = 251$ K^o /1.a 8. ábra B jelű görbét/, $T_s = 77,36$ K^o,

$T_m - T_s = 173,64$ K^o ;

$\alpha_f = 1000$ kcal/m²h^oK, $\alpha_g = 10$ kcal/m²h^oK ,

$\lambda = 400$ kcal/mh K^o ;

$$a_f = \frac{\alpha_f D \pi}{\lambda F} = 5,92 \cdot 10^3 \text{ [m}^{-2}\text{]} , \quad a_g = \frac{\alpha_g D \pi}{\lambda F} = 59,2 \text{ [m}^{-2}\text{]} ;$$

$$\sqrt{a_f} = 76,9 \text{ [m}^{-1}\text{]} , \quad \sqrt{a_g} = 7,69 \text{ [m}^{-1}\text{]} ;$$

$$\frac{\alpha_f}{\lambda} = 2,5 , \quad \sqrt{\frac{\alpha_g}{\alpha_f}} = 0,1 .$$

1./ Elsőként a /14/ egyenlettel L_f különböző értékeinél kiszámoljuk a folyadékammerülő csőszakasz alsó végén fellépő $\theta_{x=0}$ [K^o] hőmérsékletkülönbséget és a cső T_0 [K^o] hőmérsékletét.

1.1., $L_f = 15 \cdot D = 4,5 \cdot 10^{-2}$ m:

$$\text{ch } L_f \sqrt{a_f} = 15,943 , \quad \text{sh } L_f \sqrt{a_f} = 15,911 , \quad \text{cth } L_g \sqrt{a_g} = 1$$

$$\theta_{x=0} = T_0 - T_s = 0,35 \text{ K}^o , \quad T_0 = T_s + \theta_{x=0} = 77,71 \text{ K}^o .$$

1.2., $\underline{L_f = 10 D = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}}$:

$$\text{ch } L_f \sqrt{a_f} = 5,089, \quad \text{sh } L_f \sqrt{a_f} = 4,989, \quad \text{cth } L_g \sqrt{a_g} = 1$$

$$\theta_{x=0} = 1,137 \text{ K}^\circ, \quad T_0 = 78,497 \text{ K}^\circ.$$

1.3., $\underline{L_f = 5 D = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}}$:

$$\text{ch } L_f \sqrt{a_f} = 1,744, \quad \text{sh } L_f \sqrt{a_f} = 1,429, \quad \text{cth } L_g \sqrt{a_g} = 1$$

$$\theta_{x=0} = 3,87 \text{ K}^\circ, \quad T_0 = 81,23 \text{ K}^\circ.$$

1.4., $\underline{L_f = 1,5 D = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$:

$$\text{ch } L_f \sqrt{a_f} = 1,06379, \quad \text{sh } L_f \sqrt{a_f} = 0,35295, \quad \text{cth } L_g \sqrt{a_g} = 1$$

$$\theta_{x=0} = 13,05 \text{ K}^\circ, \quad T_0 = 90,41 \text{ K}^\circ.$$

2./ A kapilláriscső folyadékbamerülő végén fellépő hőmérsékletkülönbség ismeretében az /5/ egyenlettel kiszámoljuk a folyadékbamerülő szakasz hőmérsékleteloszlását. A függvénygrafikonokat a 8. és 9. ábrán mutatjuk be. Megjegyezzük, hogy a 8. ábra 1.4 jelű görbéjénél a vízszintes tengelyen 10-es és a függőleges tengelyen 0,5-ös, a 9. ábra 1.3 görbéjénél pedig az x-tengelyen 2-es skálaszorzót alkalmaztunk. A hőmérsékleteloszlási görbéket normál állapotban párolgó folyékony nitrogén esetére számoltuk: $p_{sI} = p_0 = 760 \text{ tor}$, $T_{sI} = 77,36 \text{ K}^\circ$.

A számolt eredmények és a méréssel nyert adatok összehasonlítását az alábbi módszerrel végezzük el:

a./ Állandó folyadékszint mellett $/L_g = \text{konstans}/$ ismert L_f merülési mélységnél megmérjük a munkaközeg p'_{sII2} abszolút nyomását, amely a T_{sII2} telítési hőmérséklethez tartozó telített gőz p_{sII2} nyomásából /lásd a 3. ábrát/ a melegebb környezettel való hőegyensúly beállása után alakult ki.

b./ A /26/, /27/ és /28/ összefüggésekkel p'_{sII2} mért értékét helyettesítve meghatározzuk a munkaközeg különböző halmazállapotú részeinek térfogatát, az x folyadékhányadot és a h [mm] folyadékoszlop-magasságot.

c./ p'_{sIII2} és a hőmérsékleteloszlási görbék ismeretében a /37/ és /38/ egyenletekkel kiszámoljuk a kondenzált munkaközeg mennyiségét és térfogatát.

d./ Meghatározzuk a b./ és c./ szerint számolt kondenzátum térfogatok közötti különbséget: ΔV_f [mm³].

Az a./ ... d./ szerinti adatokat a 2. táblázatban foglaltuk össze. A betöltött oxigén munkaközeg-gáz térfogata $v_M = 12,75 \text{ cm}^3$ műszer-térfogat és $p = p'_2 = 3,35$ ata töltési nyomás mellett $v = 37,8 \text{ Ncm}^3$, tömege $53,9 \cdot 10^{-6} \text{ kg}$.

Hogy kicsiny merülési mélységnél is alkalmunk legyen a munkaközeg $T_s = T_v$ hőmérsékleti értékeinek megkeresésére, a /9/ egyenlettel 1.3 és 1.4 esetekre meghatároztuk a kapilláriscső folyadék feletti szakaszának hőmérsékleteloszlását. A függvénygrafikonokat a 10. ábra szemlélteti. A /9/ egyenletben szereplő $T_1 - T_s$ [K°] értékeket a 8. és 9. ábra megfelelő görbéiből nyertük a folyadék felszínét jelölő helykoordinátáknál. A 10. ábrán a folyadék feletti szakasz adott helykoordinátáinál a kapilláriscső hőmérsékletének mért értékeit is feltüntettük.

A 10. ábrából kitűnik, hogy a /9/ egyenlet levezetésénél felvett peremfeltételek alapján az $x=0$ és $x=L_g$ helykoordinátáknál fent-álló hőmérsékletkülönbségek ismeretében a kapilláriscső folyadék feletti részének lineáris hőmérsékleteloszlását grafikus uton igen egyszerűen meghatározhatjuk.

Mint már említettük, a fázisváltozások és az állandó térfogat melletti p - T állapotváltozások gyors lefolyása és időbeli egybeesése miatt nincs lehetőség a telítési nyomás és a telítési hőmérséklet tényleges értékeinek pontos meghatározására. A számolást az a körülmény is nehezíti, hogy a v_M térfogat környezeti hőmérséklete a hataroló felületek mentén különböző. A műszer térfogatának mintegy 90 %-át kitevő felső részeknél $T_2 = T_k$, a mindenkori szobahőmérséklet. L_g szakaszon a kapilláriscső környezeti hőmérsékletét a gőz-tér-párolgási sebességétől függő - vertikális hőmérsékletprofiljai határozzák meg. Az érzékelő környezeti hőmérsékletét a már ismert hatások jelentős mértékben befolyásolják. Ezért p'_{sIII2} mért értéke alapján vett T_v vonatkozási hőmérséklet a tényleges egyensúlyi hőmérséklettől eltérő, fiktív értéket reprezentál: $T_v \neq T_{sIII2}$. A vonatkozási hőmérséklet különböző értékeit és a hozzá tartozó x_v hely-

koordinátákat a 2. táblázat 10. rovatában találjuk. A vonatkozási hőmérsékletek x_v helykoordinátáit az 1.1 ... 1.4 hőmérsékleteloszlási görbéken megkeresve azt tapasztaljuk, hogy a fiktív egyensúlyi hőmérsékletek az 1.4 eset kivételével a kondenzált munkaközeg felszíne feletti csőszakasz hőmérsékletét jelölik: $x_v > h$. Az 1.3 profilnál a vonatkozási hőmérsékletet a szabályozott folyadék felszíne feletti csőszakaszon $x = L_b = 8$ mm helykoordinátánál találjuk. A 2. táblázat 6. rovatában lévő folyadéktérfogatok számolásánál a /38/ egyenletbe a fiktív egyensúlyi hőmérséklet értékeit helyettesítettük. Az integrálási állandót az oxigén normál forráspontjánál érvényes fajtérfogat és hőmérséklet értékeivel határoztuk meg a

$$C_2 = \ln v - \frac{b}{T}$$

összefüggés segítségével.

Az eddig elmondottakból és a hőmérsékleteloszlási görbékből következik, hogy a jelenségek tényleges lefolyása L_f és L_g adott tartományában eltér a 3. ábrán vázolt menettől. A cseppfolyós oxigén munkaközeg hőmérséklete a hőegyensúly beállása után nagyobb a szabályozott felszínű folyékony nitrogén hőmérsékleténél: $T_{sII2} > T_{sI}$.

A szabályozó reagálási ideje

Az érzékelő lehülési periódusában a szabályozó reagálási idején azt a t [s] időtartamot értjük, amely alatt a 2. táblázat 2-es rovatában lévő abszolút nyomások kialakulásához szükséges hőmérsékletcsökkenés létrejön.

A reagálási idők és az időállandók számolásakor a mérésnél beállított helyzeteknél jellemző adatokat vettük figyelembe. A reagálási időt a /16/ egyenletből fejeztük ki:

$$t = \frac{1}{T} (\ln \theta_0 - \ln \theta) \text{ [s]}$$

A reagálási időt kifejező fenti összefüggésben a θ_0 kezdeti hőmérsékletkülönbség értékét mérésel állapítottuk meg: $\theta_0 = 26$ K°. A kezdeti hőmérsékletkülönbségnek megfelelő érzékelő-hőmérséklet jelentette a hőegyensúly beállítását, és a mérések indításának lehetőségét. A hőegyensúly beállása-kor a munkaközeg abszolút nyomása 3,2 ata volt. A lehülés és a kondenzálódás befejezését képező θ hőmérsékletkülönbség értékét a 8. és 9. ábra megfelelő függvénygrafikonjából nyertük a vonatkozó h [mm] folyadékoszlop magasság felét jelölő helykoordinátánál. A különböző formulákkal meghatározott időállandókat a 3. táblázat 2, 3 és 4 rovata tartalmazza. G'_c

értékét a /30/ összefüggéssel számoltuk, amelybe a 2. táblázat 6-os rovatából vett folyadéktérfogatból meghatározott G_c folyadékmennyiséget helyettesítettük. Az időálló /34/ képletében szereplő k hőátbocsátási tényezőt a /32/ egyenlettel számoltuk, amelyben a felületarányok változását is figyelembe vettük. A különböző időállókkal nyert reaklási idők értékeit a 3. táblázat 5, 6 és 7 rovatában találjuk. Számolásnál az $\emptyset 3 \times 0,5$ mm keresztmetszetű kapilláriscső alsó $L_e = 45$ mm hosszú szakaszát tekintettük hőérzékelőnek. A táblázat 7. rovata a mért reaklási időket tartalmazza.

A reaklási idők számolt és mért értékeinek összehasonlításából kitűnik, hogy az időálló tényleges nagyságát a /34/ egyenlettel számolt érték közelíti meg legjobban. Az 1.4 esetben mutatkozó tetemes eltérés a cseppfolyós nitrogén közeli szintjén lejátszódó jelenségeknek tulajdonítható, amelyek az érzékelő és a környezet közötti hőátvitelt nagymértékben befolyásolják.

A számolásnál felhasznált adatok:

$$G_e = 1,68 \text{ g}; \quad c = 0,055 \text{ cal/gr}; \quad F_e = 4,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad /teljes/;$$

$$F_c = 2,82 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad /teljes/; \quad \delta = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m};$$

$$\alpha_f = 1000 \text{ kcal/m}^2\text{h K}^\circ = 2,78 \cdot 10^{-1} \text{ kcal/m}^2\text{s K}^\circ ;$$

$$\alpha_c = 1500 \text{ kcal/m}^2\text{h K}^\circ; \quad \lambda = 400 \text{ kcal/mh K}^\circ ;$$

$$\theta_o = 26 \text{ K}^\circ ; \quad \bar{r} = 51 \text{ cal/g}.$$

A 3. táblázat 9-es rovatában az érzékelő felmelegedésénél mért reaklási időket találjuk. Mérésénél az érzékelőt az adott L_f merülési mélységből hirtelen a folyadék felszine fölé emeltük úgy, hogy a kapilláriscső alsó vége minden esetben $x=5$ mm távolságban volt a cseppfolyós nitrogén felületétől. A reaklási időn azt az időt értjük, amely alatt a munkaközeg nyomása a vonatkozó p_{sII2} [ata] értékről 3,2 ata értékre változott.

Fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a szabályozó reaklási idejét alapvetően a munkaközeg fázisváltásainál fellépő átalakulási hő nagysága és a hőátvitel körülményei szabják meg.

Összefoglalás

A működési jellemzők számolt és mért értékeinek összehasonlítása

meggyőzően bizonyítja az elméleti vizsgálat helyességét. Az ismertett eredményekből kiindulva kriogén folyadékok szintjének automatikus szabályozására alkalmas műszer családot dolgoztunk ki. A műszer család megfelelő tagjának kiválasztásával a gyakorlatban előforduló feladatok nagy része /szakaszos vagy folyamatos szabályozással/ megoldható. A műszerek között elektromágneses folyadékszelep [7] vezérlésére alkalmas egyszerű elektromos szintjelző /jelátvivő/ is szerepel.

Köszönetnyilvánítás

Solt Györgynek a matematikai leírások konzultálásáért, Pintér Attilának a mérőberendezés összeállításában nyújtott segítségért mondok köszönetet.

I r o d a l o m

- [1] Kurven- und Zahlantafeln für die Tieftemperaturtechnik. Linde AG, München, 1955.
- [2] Balla J.: Mérés és Automatika, 1969. 10. /megjelenés alatt/
- [3] В.Г. Фастовский, Ю.В. Петровский, А.Е. Повинский: Криогенная Техника, Москва, 1967 г.
- [4] Plank, R.: Handbuch der Kältetechnik, 2. Band. Berlin /Göttingen/ Heidelberg, 1953.
- [5] М.П. Малков, Ю.Б. Данилов, А.Г. Зелдович, А.Б. Фрадков: Справочник по Физико-Техническим Основам Глубокого Охлаждения, Москва, 1963 г.
- [6] Horváth M.: A vegyipari hidegtechnológia alapjai, Budapest, 1963.
- [7] Az MTA Központi Fizikai Kutató Intézetében kidolgozott hidegfizikai berendezések c. katalógus, Budapest, 1969.

Érkezett: 1969. júl. 22.

KFKI Közl. 17.évf. 5. szám, 1969.

